

Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений.

Бархатов В.А.

Статья представляет обзор методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений, применяемых в России. Проводится обсуждение путей повышения достоверности результатов контроля.

1. Введение

Начало использования ультразвукового контроля в промышленности относится примерно к 50-м годам прошлого века. Техническая реализация методов в то время была обусловлена созданием первых серийных ламповых дефектоскопов и разработкой ультразвуковых преобразователей на основе пьезокерамических элементов. За прошедший достаточно большой срок накоплен богатый опыт использования методов ультразвукового контроля.

Ультразвуковой контроль нашел широкое применение в практике дефектоскопии изделий. Согласно отчету института доктора Ферстера (INSTITUTE DR. FORSTER) [1], в восточно-европейских странах объемы неразрушающего контроля, разделенные по методам, распределяются следующим образом – рисунок 1.

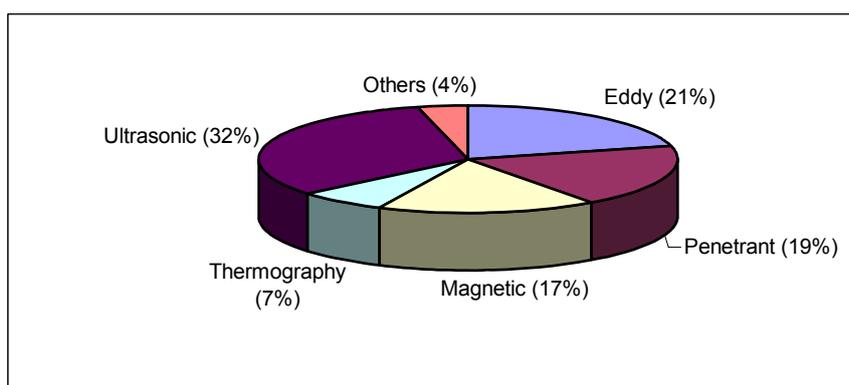


Рис.1. Распределение объемов неразрушающего контроля по основным методам.

Ультразвуковой контроль здесь занимает главенствующее положение. На его долю приходится 32% объема контроля всех изделий. В отчете также отмечается, что, не смотря на высокий уровень автоматизации труда в развитых странах, доля ручного ультразвукового контроля остается наибольшей. Это связано с тем, что большие объемы работ проводятся на объектах, находящихся в эксплуатации: атомные и тепловые электростанции, трубопроводы различного назначения, металлоконструкции, транспортные средства и т.д. Характерной чертой указанных объектов является большое разнообразие конструкций, и следовательно, методик ультразвукового контроля, поэтому работы по контролю плохо поддаются автоматизации.

Статистические данные об использовании неразрушающего контроля в России - либо носят частный характер, либо отсутствуют. В работе [2] приведено распределение средств дефектоскопии по методам неразрушающего контроля локомотивов и мотовагонного подвижного состава – рисунок 2.

Относительное количество дефектоскопов в вагонных и локомотивных депо, приведенное на рисунке 2, не точно отражает объем работ. Тем не менее, видно, что ультразвуковыми методами проводится контроль значительного количества изделий.

В других областях Российской промышленности ультразвуковой контроль занимает одно из ведущих положений. Об этом можно судить по количеству специалистов, занимающихся ультразвуковым контролем. Например, по данным Уральского центра аттестации за период 1994-2000г. аттестовано 1475 дефектоскопистов 2 уровня, из них 38% являются специалистами по ультразвуковым методам контроля. Характерной особенностью профиля работы дефектоскопистов в России является то обстоятельство, что 98% дефектоскопистов (из 38% общего их числа) работают по методикам ультразвукового контроля сварных соединений. Вторым, наиболее массовым методом контроля является радиационный метод, 26% дефектоскопистов используют его в своей деятельности.

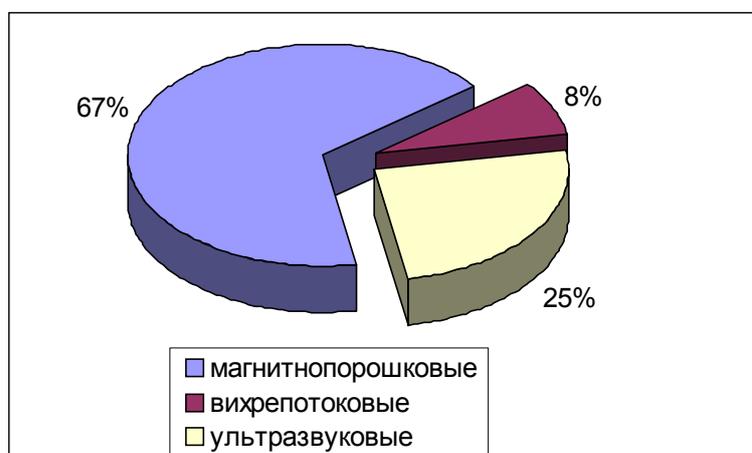


Рис. 2. Распределение средств дефектоскопии по методам контроля для локомотивов и подвижного состава.

Анализ применения ультразвуковой дефектоскопии на различных объектах [3-20] показывает, что наибольшая часть работ проводится на сварных соединениях, причем в большинстве случаев контроль выполняется вручную.

Ультразвуковой контроль в технологии сварки имеет ряд особенностей. Прозвучивание наплавленного металла и околошовной зоны осуществляется с поверхностей прилегающих деталей. Для этого используются наклонные ультразвуковые преобразователи. Контроль осуществляется в стесненных условиях, когда выявление дефектов производится не только прямым прозвучиванием, но и лучами, отраженными от донной стенки детали. В сварных соединениях наблюдается ряд эхосигналов от конструктивных особенностей шва, которые попадают в зону контроля. Существует проблема распознавания эхосигналов от дефектов.

Учитывая массовый характер контроля в технологии сварки можно говорить об отдельной **технологии ультразвукового контроля сварных соединений**.

Типовые средства ультразвукового контроля предназначены для измерения информативных параметров дефектов, таких как амплитуда эхосигнала, координаты дефекта, условные размеры. Совершенствование ультразвуковых дефектоскопов и методик на протяжении уже 3-х десятилетий

проводится в рамках указанных информативных параметров. Со временем улучшались характеристики дефектоскопа - уменьшились его габариты и вес, появились сервисные функции, такие как временная регулировка чувствительности, запоминание настроек и данных контроля, связь с ЭВМ и т.д. В методиках контроля стали использоваться новые схемы прозвучивания, например, контроль головными волнами, схемой корневой тандем и контроль с помощью хордовых преобразователей [21]. Однако, решение о годности изделия принимается на основе анализа все тех же параметров – амплитуды, координат, условных размеров. В настоящее время такие традиционные методы контроля наиболее широко используются в практике.

Дальнейшее улучшение ультразвуковой аппаратуры определялось в первую очередь достижениями микроэлектроники. Создание технологии интегральных схем, появление микропроцессоров стимулировало реализацию новых идей в ультразвуковой аппаратуре. В 70-х и 80-х годах преобладало направление создания приборов с развертками типа **B** (B-scan) и **C** (C-scan). В развертке **B** детектированные эхосигналы отображаются на плоскости, а в развертке **C** формируется объемное изображение. В этих приборах не применяется пространственная обработка эхосигналов, поэтому изображения получаются сильно размытыми. Главное преимущество здесь в том, что изображение дефектов, даже сильно искаженное, лучше воспринимается оператором, чем эхосигнал. Кроме того, прибор выдает протокол контроля.

В начале 90-х годов разработчики ультразвуковой аппаратуры стали изучать пути повышения качества изображений. Аналогичные задачи были решены в радиолокационной технике, применяемой в военных целях. Возможно, какое-то влияние оказала информация о военной технике, ставшая открытой в конце 80-х в связи с уменьшением военной напряженности. По крайней мере, имеется полная аналогия многоэлементных ультразвуковых преобразователей [22-35], созданных в этот период, с фазированными антенными решетками.

Методы обработки эхосигналов, повышающие качество изображений, имеют общее название - метод синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique). Данный метод впервые был создан для получения изображений в радарх. Позднее использовался в медицинских ультразвуковых сканерах. А в последние годы ведутся исследования по его использованию в приборах ультразвукового контроля металла.

В мире имеется общая тенденция разработки средств визуализации несплошностей [36-38], основанных на различных физических методах – ультразвуковой, радиографической, феррозондовый, вихретоковый и т.д. Это и не удивительно, так как представление данных о внутренней структуре изделий в виде изображения позволяет определить местоположение, размеры и форму дефектов, а следовательно позволяет оценить их реальную опасность. На основе анализа изображений решаются вопросы происхождения дефектов и может быть скорректирована технология изготовления, принимаются решения о возможности ремонта или о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования.

Ультразвуковой метод является, пожалуй, самым плодотворным с точки зрения формирования изображений. Высокая чувствительность, безопасность применения и оперативность ультразвукового метода делает его наиболее конкурентноспособным по сравнению с другими методами неразрушающего контроля.

2. Анализ традиционных методов ультразвуковой дефектоскопии, применяемых для контроля сварных соединений

В настоящее время методы ультразвукового контроля сварных соединений стандартизованы [39-61], также разработано большое количество инструкций, в частности [62-81].

Рассмотрим кратко особенности ультразвукового контроля сварных швов. Основным документом, нормирующим технологию контроля, является ГОСТ 14782-86. В нем определены схемы прозвучивания сварных швов (Рис.3 - 7), основные параметры системы контроля и информативные параметры дефектов.

Важной характеристикой системы неразрушающего контроля является ее воспроизводимость. Результаты контроля должны быть одинаковыми при замене дефектоскопа, ультразвукового преобразователя, стандартного образца предприятия. Воспроизводимость обеспечивается нормированием комплекса параметров системы дефектоскоп-преобразователь. ГОСТ 14782-86 устанавливает десять основных параметров:

1. Длина волны или частота ультразвуковых колебаний.
2. Чувствительность.
3. Положение точки выхода луча (стрела преобразователя).
4. Угол ввода ультразвукового луча в металл.
5. Погрешность глубиномера.
6. Мертвая зона.
7. Разрешающая способность по дальности и по фронту.
8. Характеристики электроакустического преобразователя.
9. Минимальный условный размер дефекта, фиксируемого при заданной скорости сканирования.
10. Длительность импульса дефектоскопа.

Перечисленные характеристики, их конкретные численные значения, должны оговариваться в документации на ультразвуковой контроль сварных соединений.

В сварных соединениях подвергаются контролю наплавленный металл и зоны термического влияния. Схемы прозвучивания (Рис. 3 – 7) должны обеспечивать выявление дефектов во всей контролируемой области.

Сварные соединения, как правило, прозвучиваются с поверхности околошовной зоны наклонными ультразвуковыми преобразователями. Наружный валик усиления шва не снимается.

Сварное соединение подготавливается для проведения ультразвукового контроля, производится зачистка поверхностей околошовной зоны размером 50-150мм. Ширина области зачистки зависит от толщины сварного шва. В инструкциях [62-81] оговаривается качество зачистки - шероховатость поверхности должна быть не хуже Rz40.

Основными измеряемыми характеристиками дефектов по ГОСТ 14782-86 являются:

1. Эквивалентная площадь дефекта или амплитуда эхосигнала, определенная с учетом расстояния до дефекта.
2. Координаты дефекта в сварном соединении.
3. Условные размеры дефекта.
4. Условное расстояние между дефектами.
5. Количество дефектов на определенной длине сварного соединения.

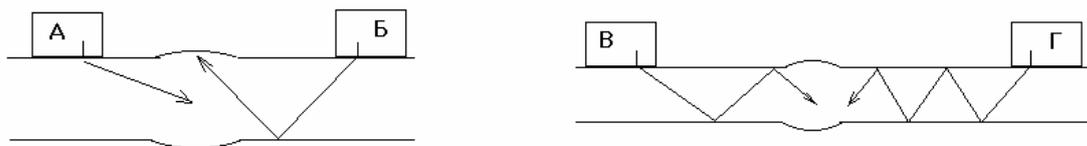


Рис. 3. Схемы прозвучивания стыковых сварных соединений эхометодом.

А - прямыми лучами преобразователя, Б - однажды отраженными лучами,
 В - дважды отраженными лучами, Г - многократно отраженными лучами.

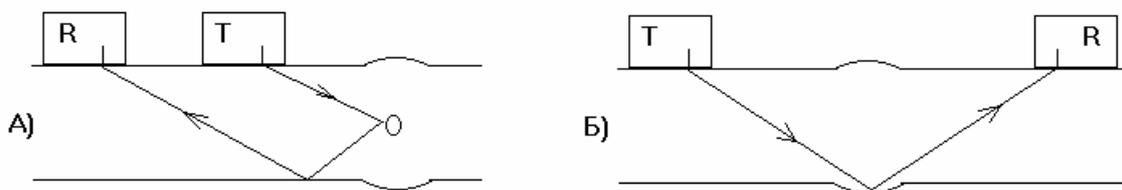


Рис.4. Схема прозвучивания тандем (А) и раздельно-совмещенная схема (Б), реализующая зеркально-теневой метод.

Т – излучающий преобразователь, R –принимающий преобразователь.



Рис.5. Схемы прозвучивания угловых (тавровых) сварных соединений эхометодом.

А – прямыми лучами преобразователя, Б –однажды отраженными лучами.

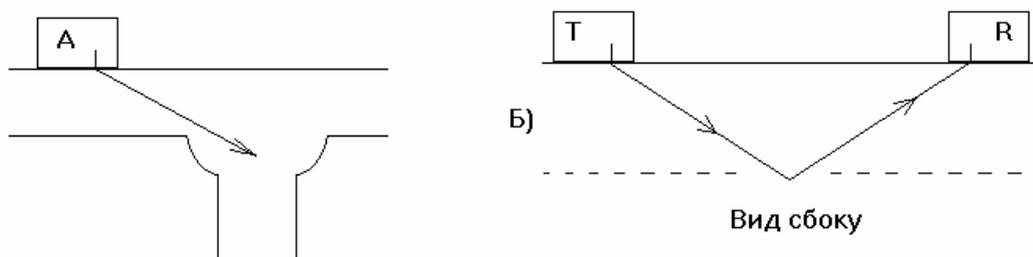


Рис.6. Схемы прозвучивания тавровых сварных соединений со стороны основной детали.

А – прямыми лучами преобразователя, Б – раздельно-совмещенная схема.

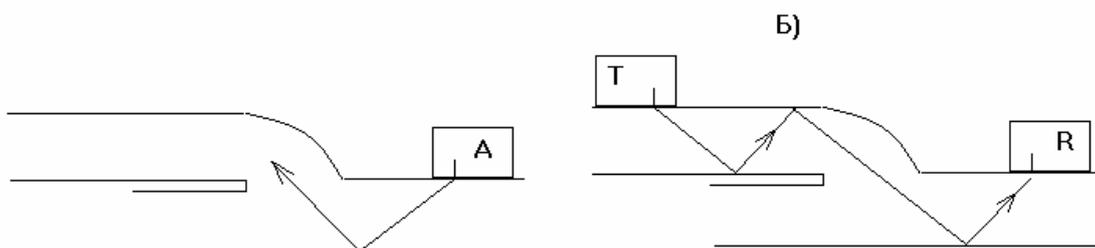


Рис.7. Схемы прозвучивания нахлесточных сварных соединений.
 А – отраженными лучами преобразователя, Б – раздельно-совмещенная схема.

В методиках ультразвукового контроля [62-81] главным измеряемым параметром является амплитуда эхосигнала от дефекта. Для разбраковки эхосигналов по амплитуде устанавливается браковочный уровень чувствительности. Браковочный уровень настраивается по стандартному образцу предприятия (СОП), в котором изготовлены искусственные отражатели, имитирующие максимально допустимый дефект. Перед проведением контроля производится настройка дефектоскопа - браковочной чувствительности - по эхосигналам от отражателей в СОП. Затем, в процессе контроля, производится сравнение эхосигнала от дефекта с браковочным уровнем. Если амплитуда эхосигнала от дефекта больше браковочного уровня – принимается решение о недопустимости дефекта, изделие бракуется. В противном случае дефект считают допустимым по амплитуде эхосигнала.

Размеры дефекта оцениваются в ультразвуковом контроле с помощью условных размеров. В основном в методиках используется условная протяженность дефекта. Условная протяженность (в миллиметрах) определяется на контрольном уровне чувствительности, который на 6дБ ниже браковочного. Ультразвуковой преобразователь перемещают вдоль сварного шва и фиксируют два положения при прозвучивании концов протяженного дефекта, в которых амплитуда эхосигнала находится на контрольном уровне. Условную протяженность измеряют линейкой как расстояние между двумя позициями преобразователя. Затем сравнивают найденную условную протяженность с максимально допустимой. Если измеренное значение больше, чем максимально допустимое – изделие бракуют.

Кроме того, в методиках ультразвукового контроля используют дополнительные критерии браковки:

- количество допустимых по амплитуде дефектов на любые 100мм длины сварного шва [62-65, 77-81], на любые 300мм [70],
- суммарная условная протяженность дефектов на любые 300мм длины сварного шва [70], на периметр сварного шва [70, 77-81],
- цепочки и скопления пор в наплавленном металле [70],
- условная высота дефекта в корне сварного шва [62,64,69].

Методы неразрушающего контроля призваны определять параметры качества изделий. Основным критерием качества сварных соединений в объектах опасных в эксплуатации является механическая прочность. Эффективность метода неразрушающего контроля нужно оценивать по тому, насколько надежно и насколько реалистично метод бракует несплошности по

их влиянию на общую прочность изделия. В настоящее время ни для одного метода нет идеального соответствия критерия браковки с требованием заданного уровня прочности. Ультразвуковые методы здесь не исключение.

Проследим логические связи критериев браковки с прочностью сварного шва. Наиболее часто встречающимися дефектами в сварных соединениях являются непровары, поры, шлаковые включения, несплавления по кромкам, трещины вдоль шва. Указанные дефекты прекрасно отражают ультразвуковые волны, такие несплошности хорошо выявляются ультразвуковым эхо-методом.

Рассмотренные характеристики дефектов и критерии браковки достаточно реалистично позволяют оценить опасность дефектов. Это подтверждает многолетняя практика использования ультразвукового метода в технологиях изготовления и ремонта сварных соединений.

До сих пор речь шла, в сущности, о дефектах технологии сварки. Но есть целый ряд дефектов, образующихся в процессе эксплуатации оборудования. Это усталостные трещины в продольном и поперечном направлении сварного шва, коррозионные повреждения зон термического влияния, питтинг-коррозия поверхностей, растрескивание в объеме зон термовлияния, свищи, местная деградация микроструктуры стали и т.д. Такие дефекты как правило имеют сильно шероховатую (изрезанную) поверхность или состоят из множества мелких неоднородностей. Эксплуатационные дефекты сильно рассеивают ультразвуковые волны, поэтому амплитуда эхосигналов от них существенно ниже, чем от гладких дефектов. Амплитуда эхосигнала слабо отражает размер дефекта.

Аналогичная ситуация наблюдается и при измерении условной протяженности. Так как в методиках контроля условная протяженность определяется на фиксированном контрольном уровне чувствительности, а амплитуда эхосигнала низкая, то измерение условной протяженности дает заниженный результат.

Нужно признать, что традиционные методы ультразвукового контроля сварных швов не надежно выявляют и оценивают эксплуатационные дефекты.

В принципе, можно получить эхосигналы от шероховатых и изрезанных дефектов, если повысить чувствительность ультразвукового дефектоскопа. В практических решениях всегда есть запас чувствительности 20-30 дБ, т.е. можно увеличить чувствительность в 10-30 раз! Однако простое увеличение чувствительности позволяет наблюдать не только эхосигналы от дефектов, но и эхосигналы от крупных зерен наплавленного металла, риск, волнистости или шероховатости поверхностей деталей. Указанные эхосигналы соизмеримы по амплитуде. Кроме того, они находятся в одной и той же зоне на экране дефектоскопа, поэтому оператор не сможет их различить. В таких условиях трудно или почти невозможно принять решение о качестве сварного шва.

На основе краткого анализа традиционных методик контроля сварных швов можно сделать вывод, что **основные проблемы адекватной оценки опасности дефектов связаны с низкой информативностью измеряемых параметров – амплитуды эхосигнала и условных размеров.**

3. Приборы визуализации данных ультразвукового контроля с развертками типа В и С

Первым и вполне логичным техническим решением, улучшающим информативность ультразвукового контроля, является представление

эхосигналов в виде двумерных изображений (развертки В и С). Принцип формирования изображения демонстрируют рисунки 8 и 9.

Построение разверток В и С производится по серии эхосигналов, полученных в процессе перемещения преобразователя по поверхности объекта контроля. Амплитуда эхосигнала характеризует яркость изображения. Эхосигналы, соответствующие заданным позициям преобразователя, отображаются (проецируются) в плоскости в определенном масштабе на дисплее. Развертка типа В (Рис.8) представляет зависимость амплитуды эхосигнала от глубины и одного из направлений сканирования (вид сбоку). Развертка типа С (Рис.9) – зависимость амплитуды эхосигнала от двух направлений сканирования (вид сверху).

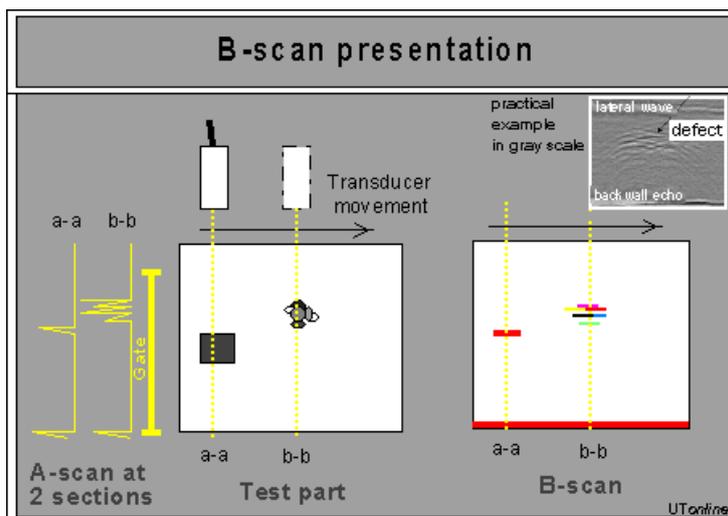


Рис.8. Представление данных прозвучивания на развертке типа В (B-scan).

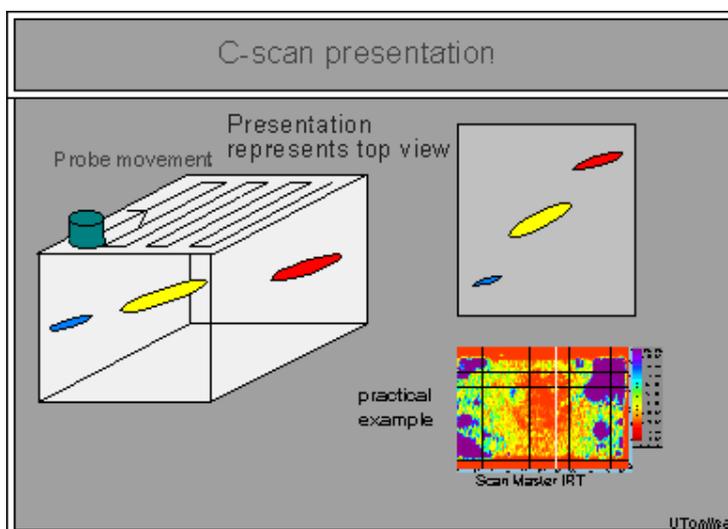


Рис.9. Представление данных прозвучивания на развертке типа С (C-scan).

Аппаратура такого класса в основном создавалась в 70-х – 80-х годах. Показателен факт, что в настоящее время в зарубежной литературе практически отсутствуют статьи, посвященные дефектоскопам с развертками В и С, полученными без применения пространственной компьютерной обработки. Поэтому ограничимся рассмотрением типичных приборов, используемых для ручного контроля сварных соединений [82-103].

Многоканальный ультразвуковой дефектоскоп «Скаруч» производства фирмы «Элтес» предназначен для контроля стыковых сварных соединений [82-86]. Габариты дефектоскопа – 200*225*90 мм³, его вес с аккумуляторами - 3,5 кг.

Дефектоскоп «Скаруч» имеет 8 ультразвуковых каналов. Его акустический блок содержит 8 наклонных ультразвуковых преобразователей, которые прозвучивают сварной шов с двух сторон, по 4 преобразователя с каждой стороны. Работа дефектоскопа осуществляется в 16-ти тактовом режиме. Каждый такт реализует заложенную схему контроля. Для каждой схемы прозвучивания заранее установлены: уровень чувствительности, положение и длительность стробов, амплитудные пороги фиксации дефекта. Акустический блок перемещается вручную вдоль сварного соединения. В процессе сканирования с шагом 1мм по пути фиксируются эхосигналы во всех 16-ти тактах, которые затем обрабатываются в дефектоскопе.

Обработка эхосигналов встроенным микропроцессором позволяет идентифицировать тип дефекта (объемный, плоскостной, объемно-плоскостной). Определение параметров дефекта происходит путем сравнения всех принятых от него сигналов и выделения максимальных амплитуд для эхометода и минимальных - для зеркально-теневого метода.

Результаты контроля просматриваются на экране дефектоскопа, а подключив к дефектоскопу принтер - можно их распечатать. По данным контроля оценивают качество всего сварного соединения в соответствии с нормативными документами. Пример протокола результатов контроля, выдаваемого дефектоскопом «Скаруч», показан на рисунке 10.

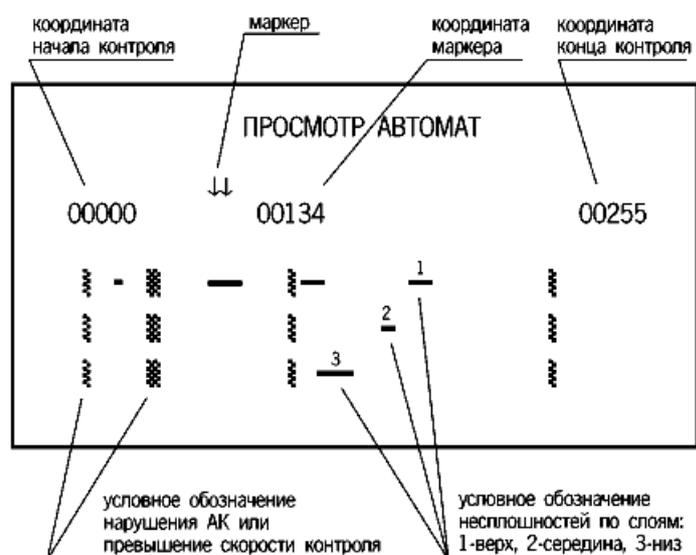


Рис. 10. Вид протокола результатов ультразвукового контроля в дефектоскопе «Скаруч».

Другой пример - современная высокопроизводительная система ультразвукового контроля ISONIC [87-99], которая применяется для ручного контроля сварных соединений и основного металла на нефтедобывающих морских платформах. Система ISONIC содержит одноканальный ультразвуковой

дефектоскоп, систему мониторинга положения преобразователя и компьютер. Принцип работы аппаратуры ISONIC демонстрирует рисунок 11.

Контроль сварных соединений посредством системы ISONIC производится вручную. Оператор перемещает ультразвуковой преобразователь, прозвучивая сварной шов с различных позиций. Система ISONIC автоматически определяет положение преобразователя на изделии и сопоставляет с этим положением ультразвуковые эхосигналы. Затем производится формирование развертки типа В или С и изображение дефектов выводится на дисплей.

Использование ручного сканирования в сочетании с автоматической записью данных контроля обеспечивает высокую оперативность и гибкость применения системы на объектах, находящихся в эксплуатации. В задачах контроля объектов с разнообразной конфигурацией трудно представить механический сканер более универсальный, чем рука человека.

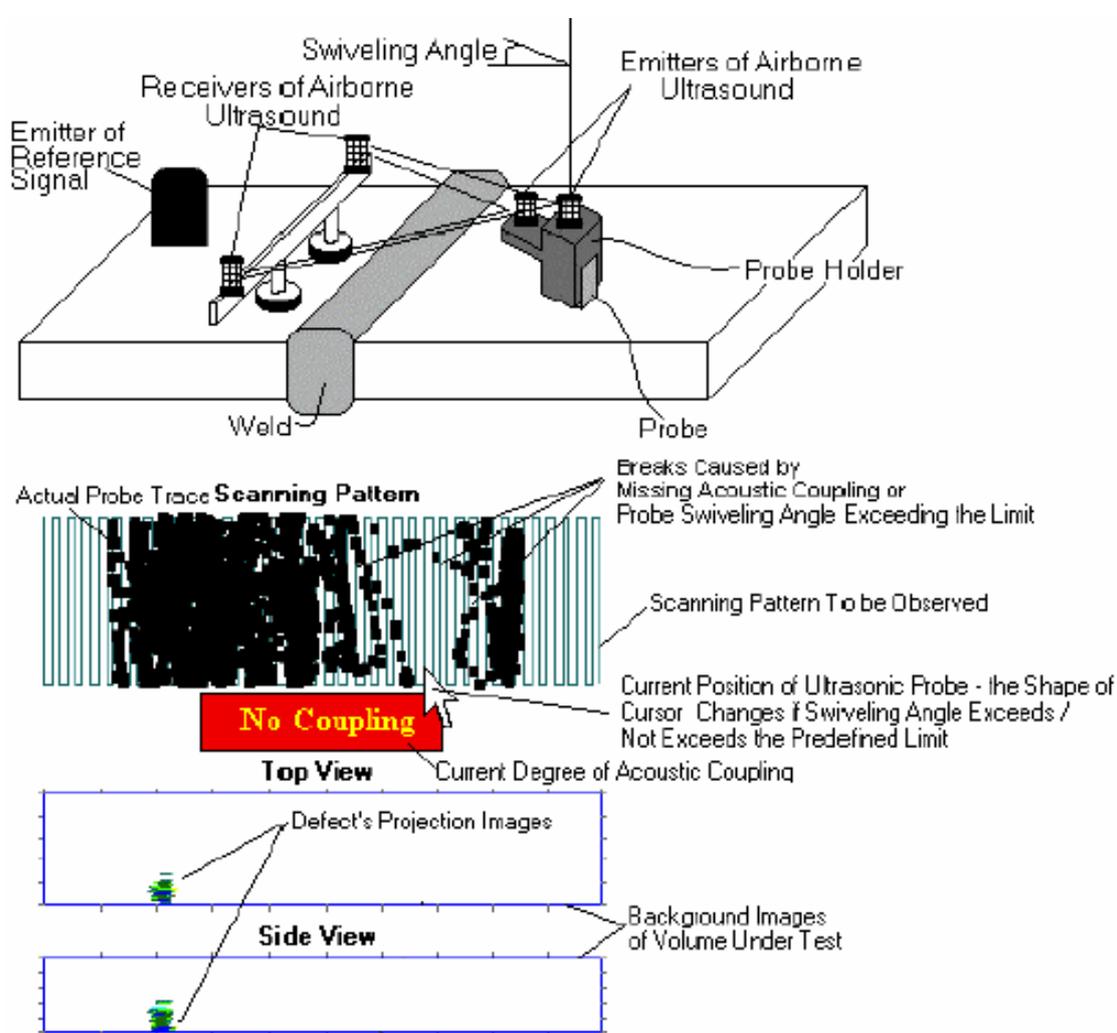


Рис.11. Принцип действия ультразвуковой системы ISONIC.

Необходимо отметить уникальную систему мониторинга положения преобразователя, которая входит в состав ISONIC (см. Рис. 11). Система основана на ультразвуковом методе измерения расстояний в воздушной среде. В ней, на рабочий преобразователь установлены два импульсных ультразвуковых излучателя, которые формируют акустические зондирующие

импульсы в воздухе. На противоположной стороне сварного шва располагается скоба с двумя приемниками. Система мониторинга определяет задержки акустических сигналов, прошедших расстояние от излучателей до приемников, затем, по этим данным рассчитывает координаты рабочего преобразователя и его ориентацию.

Дополнительно на изделие устанавливается еще один излучатель (Emitter of Reference Signal). Производится измерение задержки акустических сигналов, прошедших расстояние от этого неподвижного излучателя до приемников. Полученные данные используются для коррекции ошибок основных измерений связанных с наличием ветра и с изменением скорости звука в воздухе.

В последней версии системы ISONIC с целью улучшения качества изображений применяется обработка сигналов с помощью одной из разновидностей метода синтезированной апертуры - TOFT (TIME OF FLIGHT DIFFRACTION) [96-98].

В работах [100, 101] приведено описание установки для ультразвукового контроля твелов. Здесь, иммерсионным эхо-методом осуществляется прозвучивание стенки твела толщиной 3,5 мм. Частота ультразвукового преобразователя может меняться в диапазоне 25 – 50 МГц. По результатам прозвучивания строится изображение дефектов в виде развертки типа В.

Развертки типа В были использованы в аппаратуре ультразвукового контроля железнодорожных рельсов [102, 103]. На изображениях хорошо выявляются трещины в зоне болтовых соединений рельсов [102] и типичные дефекты сварных швов [103].

4. Обзор основных достижений в области ультразвуковой компьютерной томографии

Следующим шагом в развитии ультразвуковой аппаратуры является создание томографических установок представляющих данные контроля в виде изображений.

Ультразвуковые томографы в первую очередь нашли широкое применение в медицинских диагностических исследованиях. Это обусловлено в значительной степени тем, что ультразвуковое излучение не оказывает вредного воздействия на пациента. Кроме того, задача построения изображения мягких тканей оказывается значительно проще с точки зрения теоретической постановки и в практической реализации. Главным фактором здесь является низкая скорость звука 1400 – 1600 м/с, поэтому на ультразвуковых частотах можно получить достаточно короткую длину волны в сочетании с узкой диаграммой направленности преобразователя.

Рассмотрим характерные особенности медицинских ультразвуковых томографов на примере аппаратуры ведущих производителей – американской фирмы Acuson и фирмы SonoSite.

Во всех ультразвуковых сканерах реализован эхоимпульсный метод. Используются ультразвуковые преобразователи с частотой 3-10 МГц для прозвучивания мягких тканей в области размером 10-15 см и преобразователи с частотой 7-15 МГц для диагностирования малых объектов, например яблока глаза.

В системах ультразвуковой диагностики используются многоэлементные ультразвуковые преобразователи поставляемые в виде

акустических блоков. В настоящее время применяют блоки, содержащие до 128 пьезоэлементов. Такое построение акустической системы является в настоящее время общепринятым.

К сожалению, в технических описаниях медицинской диагностической аппаратуры имеются только общие сведения относительно способов построения изображений. Данная информация является «know-how» производителя.

Типичным примером может служить установка фирмы Acuson **CYPRESS 128XP**. Установка имеет вес 9 кг. На рисунке 12. показано высококачественное изображение печени человека, полученное на данной установке. Время синтеза изображения около 6 секунд. Изображение обработано с применением пространственного фильтра, в результате чего появляется эффект объемности.



Рис 12. Изображение печени Первалова С.П., полученное с помощью установки **ACUSON /CYPRESS 128XP**

В последние годы на рынке диагностической аппаратуры появились малогабаритные ультразвуковые сканеры. Например, фирма Sonosite выпустила прибор **Sonosite 180TM** весом 2,4 кг, который предназначен для экспресс-диагностики в бригадах скорой помощи. В приборе **Sonosite 180TM** также применяются 128 элементные акустические блоки. На рисунке 13. показано изображение сердца человека, полученное с помощью прибора **Sonosite 180TM**. Время синтеза изображения составляет 100 мс (10 раз в секунду), поэтому прибор демонстрирует работу сердца в режиме отображения, близкому к реальному времени.

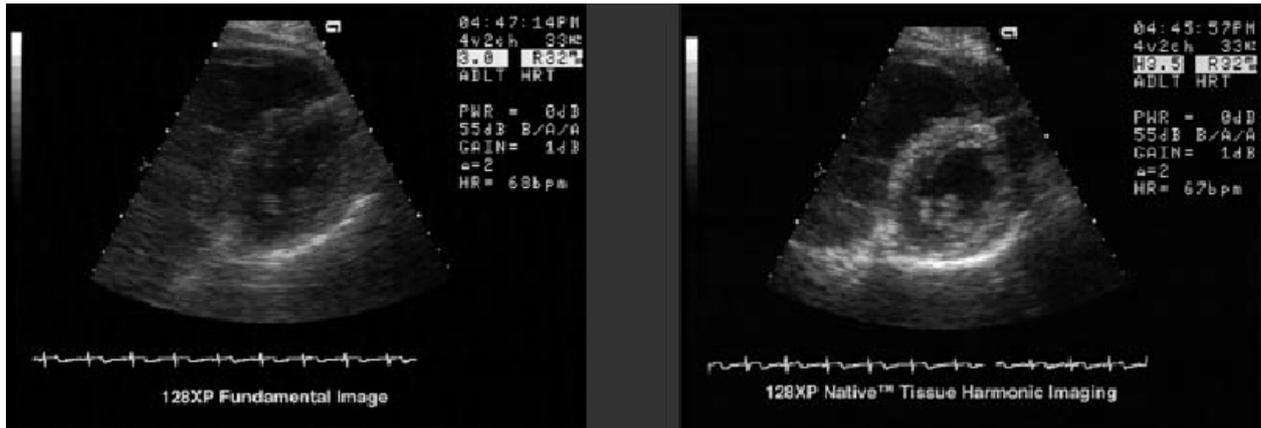


Рис. 13. Изображение сердца человека, полученное с помощью прибора **Sonosite 180TM**.

Медицинские ультразвуковые сканеры характеризуются пространственной разрешающей способностью или апертурой изображения. Этот параметр практически у всех установок составляет 1 см^2 . Данную величину нужно понимать следующим образом. Если в мягких тканях присутствует объект малых размеров, который создает эхосигналы, то изображение объекта на экране сканера получается в виде пятна с эквивалентным размером $10 \times 10\text{ мм}$.

Существует ряд исследовательских установок, так называемых ультразвуковых микроскопов, с помощью которых решается задача визуализации рельефа поверхности объекта с высоким разрешением [104-112]. В указанных установках прозвучивание поверхности осуществляется имерсионным способом (в водяной ванне) – Рис. 14. При этом используются высокочастотное ультразвуковое излучение $30 - 50\text{ МГц}$, что соответствует длине волны в воде $0,05 - 0,03\text{ мм}$.

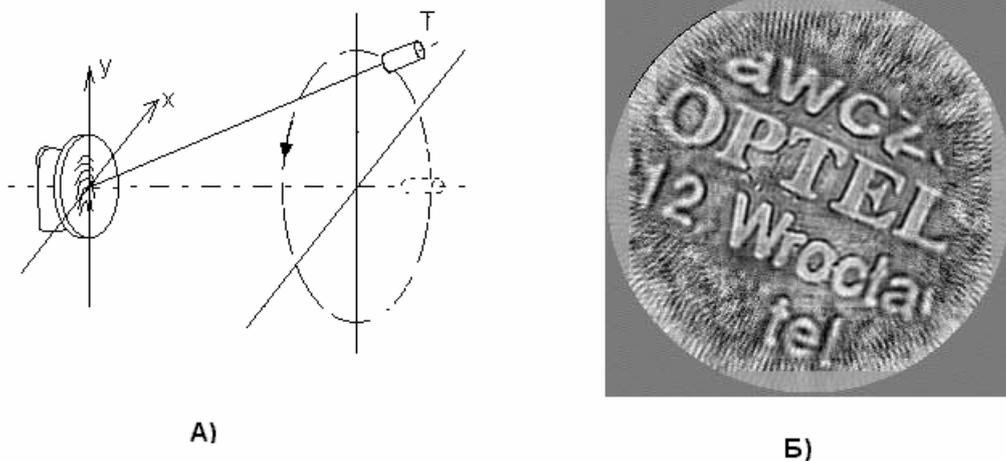


Рис. 14. Принцип работы ультразвукового микроскопа (по материалам статьи [106]).

- А). Схема прозвучивания поверхности объекта в водяной ванне.
- Б). Пример изображения поверхности монеты.

За счет очень короткой длины волны удается сформировать узкий ультразвуковой пучок и получить достаточно детальную информацию о рельефе поверхности. Дополнительная обработка эхосигналов методом

синтезированной апертуры позволяет строить изображения с высоким фронтальным разрешением. Пример изображения, заимствованный из работы [106], показан на рисунке 14.Б.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию ультразвуковых сканеров, предназначенных для визуализации дефектов в металле.

В частности, в России на предприятии «Эхо плюс» производится установка «Авгур - 4.2» [113-116]. Данная установка предназначена для ультразвукового контроля сварных соединений. В состав установки входит персональный компьютер (notebook) с дополнительными электронными блоками, малогабаритный двухкоординатный сканер, ультразвуковые преобразователи.

В процессе контроля двухкоординатный сканер перемещает блок ультразвуковых преобразователей по поверхности околошовной зоны. Производится прозвучивание сварного шва и запоминание эхосигналов, полученных в различных положениях преобразователей. Далее, на персональном компьютере производится синтез изображения. Пример визуализации дефектов в сварном шве толщиной 36мм с помощью системы «Авгур - 4.2» показан на рисунке 15.

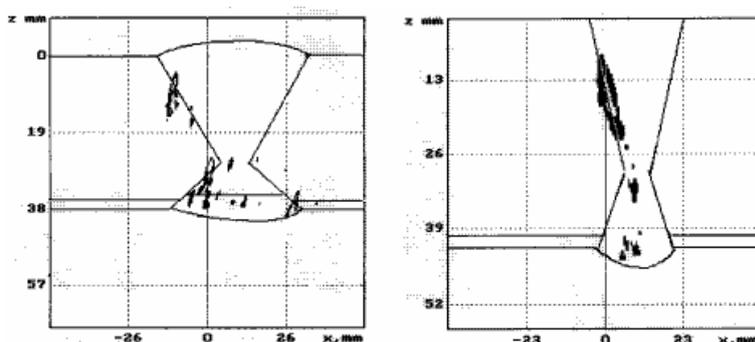


Рис. 15. Изображение дефектов в стыковом сварном шве, полученное с помощью аппаратуры «Авгур-4.2»

Канадская фирма Tektrend выпускает оборудование для ультразвукового контроля металлов и соответствующее программное обеспечение. Представляет интерес программа ARIUS Viewer предназначенная для синтеза 2-х и 3-х мерных изображений по данным контроля эхометодом. Различные задачи визуализации дефектов с помощью программы ARIUS Viewer рассматриваются в [117-119]. Например, на рисунке 16. представлено изображение дна алюминиевого листа с искусственными дефектами. Толщина листа - 8мм. Прозвучивание проводилось прямым преобразователем с частотой 10 МГц.

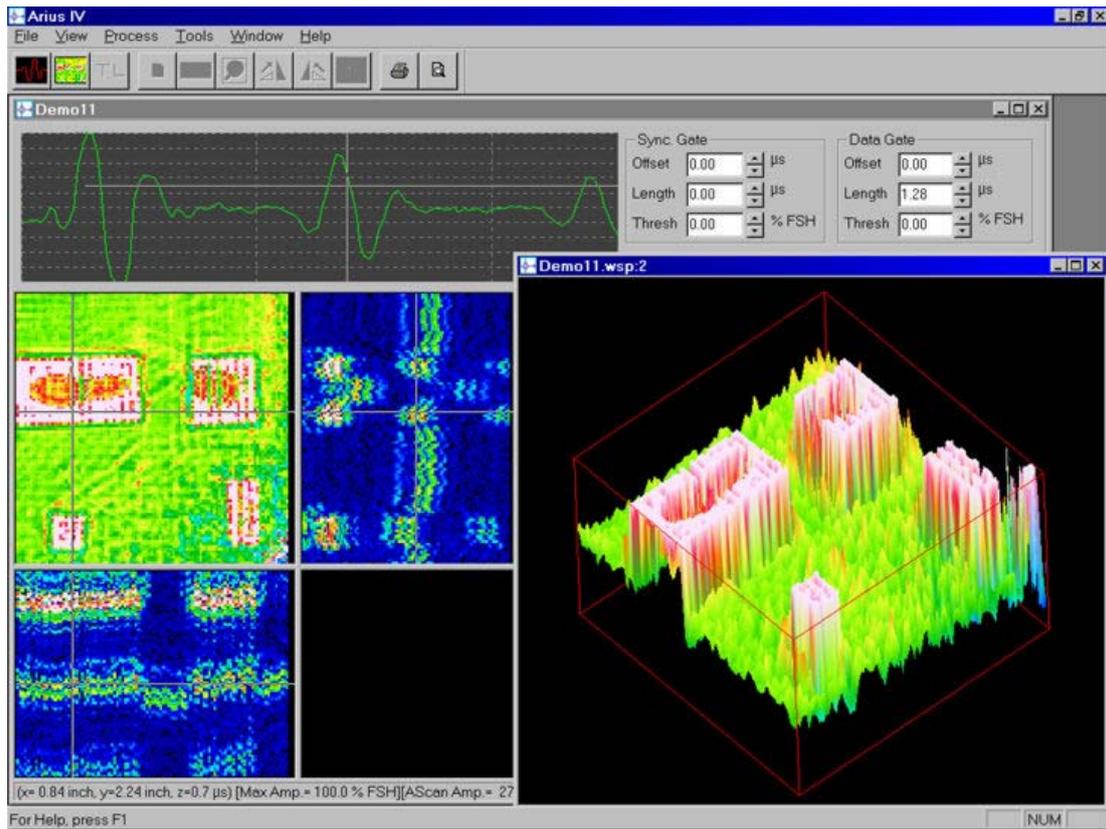


Рис. 16. Изображение дефектов на нижней поверхности алюминиевого листа, синтезированное программой ARIUS Viewer.

Существует также ряд аналогичных установок, обеспечивающих визуализацию дефектов: IZOGRAF-4.01 [120], P-scan System 4 [121], ULTIMA 100+ [122] и другие.

5. Способы реконструкции акустических изображений

Метод синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique, или сокращенно SAFT) на самом деле представляет собой общее название для целого ряда технологий реконструкции акустических изображений. Математические приемы формирования изображений, так или иначе, направлены на уменьшение неопределенности расположения отражателей, возникающей из-за волновой природы излучения. Название SAFT дословно переводится как – техника искусственной фокусировки апертуры. Ясно, что эхосигналы в ультразвуковой системе несут неполную (размытую) информацию об отражателях. Методы SAFT используют различную обработку сигналов, после которой неопределенность расположения и формы дефектов резко уменьшается и, дополнительно, данные о дефектах представляются в виде двумерных или 3-х мерных картин.

Способы обработки сигналов неразрывно связаны с физическими закономерностями их формирования. В ультразвуковом контроле выделяют два независимых метода получения информации о дефектах – эхо-метод и теневой метод, соответственно методы SAFT делятся на две группы.

Наибольший интерес представляет эхо-метод и связанные с ним методы синтезированной апертуры. Известны две основных разновидности методов синтеза изображения – метод расчета во временной области (time domain technique) и метод расчета в частотной области (frequency domain technique).

Метод расчета во временной области использует эхосигналы, полученные с различных направлений прозвучивания. Акустическое изображение рассчитывается следующим образом [123]

$$b(x, z) = \left| \sum_{x_b=x_{b1}}^{x_{b2}} \sum_{x_e=x_{e1}}^{x_{e2}} P_c(\tau_{be}) \right|. \quad (1)$$

Величина $b(x, z)$ дает яркость изображения в плоскости координат x, z . Суммированию подвергаются высокочастотные ультразвуковые эхосигналы $P_c(\tau_{be})$, индекс «с» здесь отмечает пару преобразователей – излучатель и приемник, от которых получен эхосигнал. Временной отсчет эхосигнала τ_{be} сопоставляется с точкой изображения (координаты x, z) исходя из геометрического расположения ультразвуковых преобразователей

$$\tau_{be} = (r_b + r_e) / C_l, \quad r_b = \sqrt{(x_b + x)^2 + z^2}, \quad r_e = \sqrt{(x_e + x)^2 + z^2}. \quad (2)$$

В выражениях (2) индекс «b» обозначает номер излучателя, в индекс «e» - номер приемника. Соответственно, x_b и x_e - координаты x излучателя и приемника, координата z для всех преобразователей равна нулю, r_b - расстояние от излучателя до точки расчета, r_e - расстояние от приемника до точки расчета, C_l - скорость продольных волн.

Формула (1) используется в случае конечного числа преобразователей, когда прозвучивание осуществляется с помощью акустического блока, содержащего набор преобразователей. Возможен другой вариант, когда производится сканирование блоком преобразователей по поверхности объекта. Тогда выражение (2) преобразуется в интеграл вида

$$b(x, z) = \left| \int_{x_{b1}}^{x_{b2}} \int_{x_{e1}}^{x_{e2}} P_c(\tau_{be}) dx_b dx_e \right| \quad (3)$$

В расчетах по формулам (1) и (3) необходимо использовать ограниченные блоки данных эхосигналов. Алгоритм слабо защищен от воздействия шума и помех. Для улучшения помехозащищенности изображения применяют осреднение данных, используя в расчетах многократное прозвучивание с одних и тех же направлений. Дополнительная обработка изображения в методе расчета во временной области выглядит следующим образом

$$B(x, z) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N b_i(x, z) \quad (4)$$

Заслуживает внимания еще один вариант метода расчета во временной области, основанный на вычислении корреляционных функций [124]. Пусть акустический блок содержит N преобразователей, каждый из которых работает

в совмещенном режиме. Рассмотрим эхосигналы, от точечного отражателя, расположенного в области прозвучивания. Координаты отражателя обозначим x, y, z . Получим серию эхосигналов от каждого из преобразователей. – $X_i(t)$, $i=[1-N]$. Корреляционная функция двух эхосигналов выражается интегралом

$$R_{ij}(t) = \int_0^{t_{MAX}} X_i(t) \cdot X_j(t) \cdot dt . \quad (5)$$

Вычисление корреляционной функции производится в ограниченном диапазоне времен от 0 до некоторого t_{MAX} , отмечающего дальнюю границу области прозвучивания.

Два эхосигнала $X_i(t)$ и $X_j(t)$ от одного и того же отражателя, будут максимально коррелировать, если ввести задержку τ , учитывающую разность длины пробега волн для преобразователей i и j . Таким образом корреляционную функцию, настроенную на выявление отражателя в точке пространства x, y, z , вычисляют как

$$R_{ij}^{x,y,z}(\tau) = \int_0^{t_{MAX}} X_i(t+\tau) \cdot X_j(t) \cdot dt . \quad (6)$$

Далее интенсивность изображения вычисляют как сумму корреляционных функций вида (6)

$$I(x, y, z) = \frac{1}{2N} \sum_{i \neq j} R_{ij}^{x,y,z}(\tau_{ij}) . \quad (7)$$

Метод расчета во временной области довольно просто реализуется на ЭВМ, но требует больших вычислительных затрат. Вычисление изображений в реальном времени данным методом может быть реализовано на ЭВМ с высокой производительностью. Перспективным направлением в создании вычислительной аппаратуры здесь является применение цифровых сигнальных процессоров (digital signal processors - DSP) [125] и параллельных спецвычислителей на основе программируемых логических матриц высокой степени интеграции (field programmable gate arrays - FPGA) [126].

Рассмотрим теперь реконструкцию акустического изображения посредством метода расчета в частотной области [127]. В литературе часто используется сокращенное название – FD-SAFT.

Пусть используется один прямой ультразвуковой преобразователь, работающий в совмещенном режиме. Сопоставим ортогональную систему координат с изделием и предположим, что производится сканирование по его поверхности $x, y, z=0$. Обозначим $U(x, y; 0, t)$ эхосигналы, полученные ультразвуковым преобразователем в процессе сканирования. Затем с помощью преобразования Фурье получим комплексные спектры эхосигналов

$$U(x, y; 0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y; 0, t) \cdot \exp(i\omega t) dt , \quad t_{ref} = 0. \quad (8)$$

Начало отсчета времени, $t_{ref} = 0$, для каждого акта прозвучивания выбирается в момент излучения акустического зондирующего импульса. Таким образом, отсчет времени $t_{ref} = 0$ сопоставляем с началом отсчета координаты $z=0$.

Найдем пространственное двумерное преобразование Фурье для каждой частотной компоненты эхосигналов

$$A(K_x, K_y; 0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y; 0, \omega) \cdot \exp(i \cdot (xK_x + yK_y)) dx dy, \quad (9)$$

где: $K_x = \alpha \cdot k$, $K_y = \beta \cdot k$, K_x и K_y проекции волнового вектора $k = \omega/C$ на оси координат x, y ; α и β - косинусы углов между направлением волнового вектора и осями координат x, y , соответственно; $i = \sqrt{-1}$.

Комплексная функция $A(K_x, K_y; 0, \omega)$ характеризует эхосигналы в области при $z=0$, т.е. на поверхности сканирования. Ее можно использовать далее для расчета комплексных картин на любой другой глубине изделия $z > 0$. Для расчета спектра эхосигналов на какой-либо глубине z вводится функция распространения поля $B(z, \omega)$. В работах [128-129] получено приближенное значение данной функции при прозвучивании прямым преобразователем

$$B(z, \omega) = \exp(iskzD), \quad D = (1 - (K_x / sk)^2 - (K_y / sk)^2)^{1/2}, \quad (10)$$

где: $s = 1$ для случая фиксированных положений излучателя и приемника и $s = 2$ случая непрерывного сканирования.

Эффект распространения волн от поверхности $z=0$ к поверхности z заключается в добавлении относительного фазового сдвига в волновые компоненты. В этом и заключается смысл введения функции $B(z, \omega)$. Расчет комплексного поля на глубине z производится по формуле

$$A(K_x, K_y; z, \omega) = A_0(K_x, K_y; 0, \omega) B(z, \omega). \quad (11)$$

Способ синтеза изображения состоит в обратном преобразовании спектров. В начале получают серию одночастотных картин с помощью пространственного обратного преобразования Фурье

$$U(x, y, z, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(K_x, K_y; z, \omega) \cdot \exp(-i \cdot (xK_x + yK_y)) dK_x dK_y, \quad (12)$$

затем производят их осреднение по частотному диапазону

$$\langle U(x, y; z) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, \omega) d\omega, \quad (13)$$

Изображение дефектов на глубине z обычно представляют яркостной картиной, отображая модуль $|\langle U(x, y; z) \rangle|$.

В практике, однако, функция U измеряется в виде набора эхосигналов, полученных в фиксированных положениях преобразователя, например, используется многоэлементный акустический блок, в котором преобразователи установлены с шагом δx и δy .

Физически это приводит к тому, что пространственный спектр (9) становится дискретным, в то время как частотный спектр остается непрерывным. Обозначим набор пространственных гармоник как K'_x и K'_y , тогда (12) и (13) можно переписать в виде

$$\begin{aligned}
\langle U(x, y; z) \rangle &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(K'_x, K'_y; z, \omega) \cdot \exp(-i \cdot (xK'_x + yK'_y)) dK'_x dK'_y \right\} d\omega = \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} A(K'_x, K'_y; z, \omega) d\omega \right\} \exp(-i \cdot (xK'_x + yK'_y)) dK'_x dK'_y \quad (14)
\end{aligned}$$

Изменив порядок интегрирования в (14), выделим частотное преобразование (в фигурных скобках), которое соответствуют пространственным гармоникам. Изображение $\langle U(x, y; z) \rangle$, таким образом, формируется в частотной области путем двумерного обратного преобразования Фурье.

Суммируя сказанное, перечислим этапы расчетов изображения методом расчета в частотной области:

1. Преобразование Фурье всех эхосигналов, полученных после провучивания,
2. Выделение частот, которые будут использованы для реконструкции, и запоминание серии спектров эхосигналов $U(x, y; 0, \omega)$,
3. Расчет двумерных Фурье образов каждого из спектров, т.е. вычисление комплексных полей $A(K'_x, K'_y; 0, \omega)$,
4. Применение функции распространения поля $B(z, \omega)$ к каждому из комплексных полей и преобразование их в поля на глубине z , $A(K'_x, K'_y; z, \omega)$,
5. Осреднение по частотным компонентам ω и формирование $\langle A(K'_x, K'_y; z) \rangle$,
6. Окончательно, расчет обратного преобразования Фурье и получение изображения в плоскости на глубине z , $|\langle U(x, y; z) \rangle|$.

Если ставится задача получения трехмерного изображения, то вышеперечисленные расчеты проводятся для разных глубин z и из совокупности двумерных картин $|\langle U(x, y; z) \rangle|$, затем составляется трехмерное изображение.

Метод расчета изображения в частотной области эффективно уменьшает разрешающую способность преобразователей по фронту, но разрешающая способность по дальности улучшается всего на 20-30% [130].

Отметим, что данный метод, реализованный в вычислительной машине, обеспечивает самое быстрое вычисление изображения, т.к. применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) [131]. Поэтому метод расчета в частотной области и его модификации широко используются в медицинских ультразвуковых сканерах.

Применение расчетов в частотной области в задачах ультразвукового контроля металла мало эффективно, т.к. в металлах высокая скорость звука и, следовательно, большая акустическая длина эхосигнала. Подтверждением тому является факт, что в экспериментальных ультразвуковых установках, предназначенных для контроля сталей и алюминиевых сплавов, используется в большинстве случаев метод расчета во временной области и его модификации.

6. Проблемы создания устройств визуализации дефектов в сварных швах

Разработчикам ультразвуковой аппаратуры нового поколения придется решить ряд сложных проблем. Дело в том, информация об отражателях, содержащаяся в эхосигналах, согласована между собой лишь отчасти. Объект контроля проявляет различные свойства при прозвучивании его с различных направлений. Невозможно указать точные соотношения (формулы), по которым можно было бы непосредственно рассчитать изображение. В связи с этим задача восстановления изображения относится к классу не строгих задач.

Процедуры реконструкции изображений всегда содержат эмпирические положения, основанные на здравом смысле и на физической природе явления. Кстати, вид изображения сильно зависит от того, какие идеи положены в основу синтеза, как разработчик желает показать изображение оператору. Создание способов реконструкции изображений представляет собой дисциплину, занимающую место где-то между наукой и искусством.

Необходимо выразить наш подход к конечному результату, к виду изображения. В задачах ультразвуковой дефектоскопии объектов, опасных в эксплуатации, результатом обследования является решение о пригодности или непригодности изделия. Решение выносится на основе анализа формы и размеров дефектов. Главный критерий здесь - влияние дефекта на прочность изделия. Ультразвуковой сканер, поэтому, должен надежно выявлять и отображать дефекты, а также должен максимально детально изображать их форму, размеры и местоположение. Изображение сканера должно быть похоже больше на чертеж изделия с дефектами, чем на реальное изображение, на котором интенсивность пропорциональна коэффициенту отражения. Тем самым, прибор, некоторым образом направляет оператора к принятию того или иного решения. Представляет ему данные в форме, упрощающей анализ дефектов.

Дополнительно, изображение на сканере должно показывать границы изделия. В задачах контроля сварных соединений это принципиально важное замечание. В практике часто встречается ситуация, когда конструкция сварного шва точно не известна. Могут присутствовать проточки в корне сварного соединения, подкладные кольца, смещение кромок деталей, непараллельность стенок, разнотолщинность деталей по длине сварного шва и т.д.

Первая проблема состоит в создании системы прозвучивания. В Российских методиках ультразвукового контроля ввод ультразвуковых волн осуществляется с поверхности околошовной зоны. При этом наружный валик усиления не снимается. Поверхность ввода сильно ограничена. Практически единственный способ получения эхосигналов от дефектов в сварном шве – это прозвучивание с помощью наклонных ультразвуковых преобразователей. Ультразвуковой сканер должен содержать блок наклонных преобразователей.

Эхосигналы от дефектов в сварном шве формируются прямыми лучами преобразователя, а также однажды отраженными лучами. Это еще одна особенность акустической системы. Для правильной интерпретации дефекта в сечении шва необходимо знать точное расположение донной стенки детали. Кроме того, необходимо определить взаимное расположение стыкуемых деталей. Ультразвуковой сканер должен содержать подсистему измерения размеров деталей и их взаимную ориентацию.

Таким образом, разработка акустического блока представляет собой сложную техническую задачу. На рисунке 17 в качестве примера показан

способ прозвучивания стыкового сварного шва посредством двух акустических блоков А и В. Здесь толщина деталей составляет 12мм. Причем правая деталь смещена вниз относительно левой детали на 3мм и повернута на 4 градуса. В центре рисунков пунктирной линией обведена область сварного шва, в которой производится реконструкция изображения.

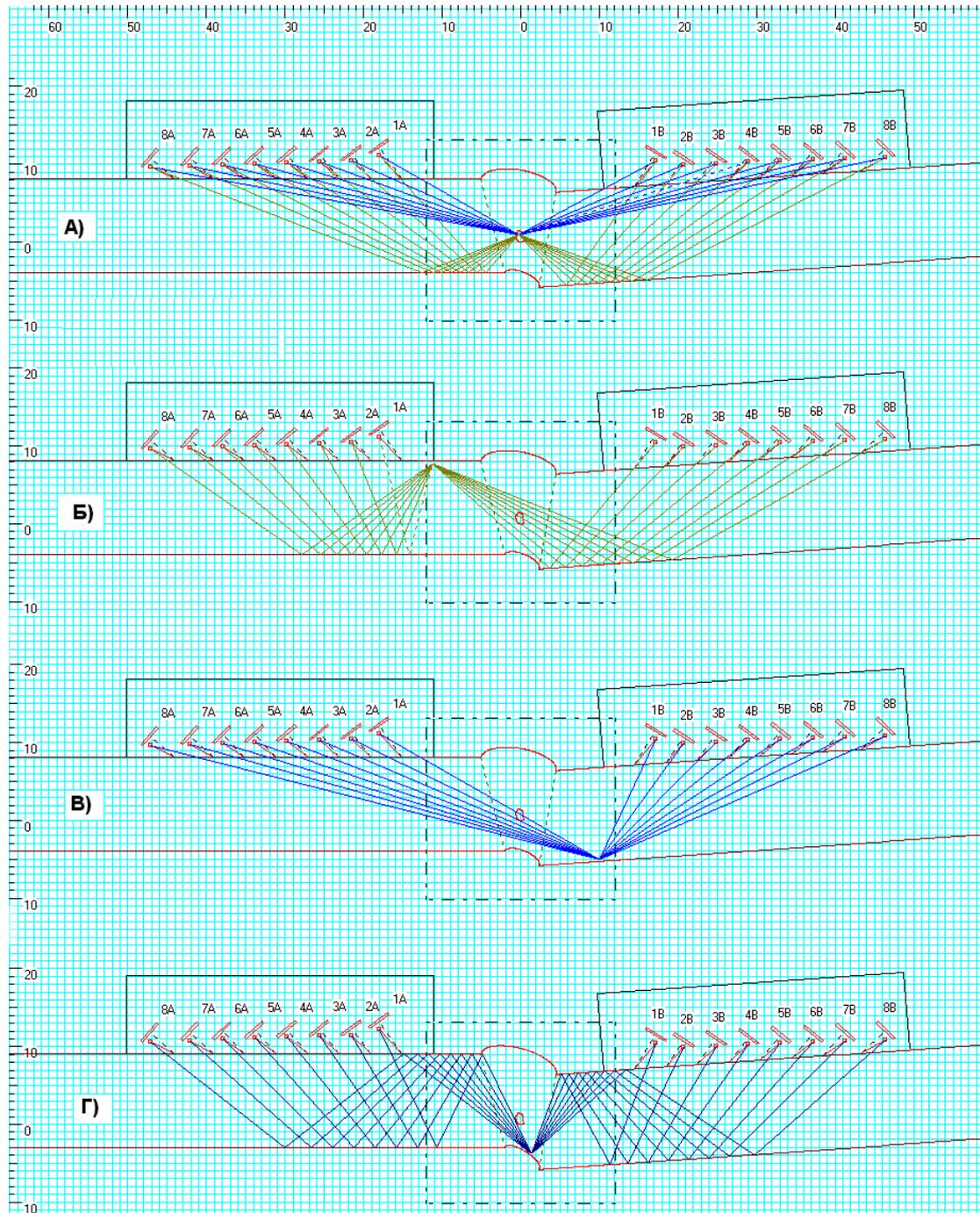


Рис.17. Прозвучивание стыкового сварного шва с помощью двух акустических блоков.

- А) - выявление дефекта в середине наплавленного металла прямыми и однажды отраженными лучами преобразователей,
- Б) - прозвучивание верхней границы детали однажды отраженными лучами,
- В) – прозвучивание донной поверхности детали,

Г) – прозвучивание корня сварного соединения дважды отраженными лучами.

Прозвучивание сварного шва (Рис. 17) производится прямыми, однажды отраженными и дважды отраженными лучами преобразователей. Как видно, акустические блоки А и В обеспечивают выявление практически всех видов дефектов в наплавленном металле и околошовных зонах.

Вторая проблема заключается в способе интерпретации эхосигналов в виде отражающих границ на изображении. Вначале введем понятие проекции эхосигнала.

Пусть имеется ультразвуковой преобразователь, работающий в совмещенном режиме и прозвучивающий некоторый дефект (Рис.18.). Естественно, получаем эхосигнал от дефекта. Рассмотрим вопрос о том, каким образом информацию, заложенную в эхосигнале, можно представить графически, в плоскости изображения объекта? Рассуждения начнем с того, что нам ничего не известно ни о размерах дефекта, ни о его расположении в пространстве. Может наблюдаться ситуация, когда два или более отражателя формируют один эхосигнал.

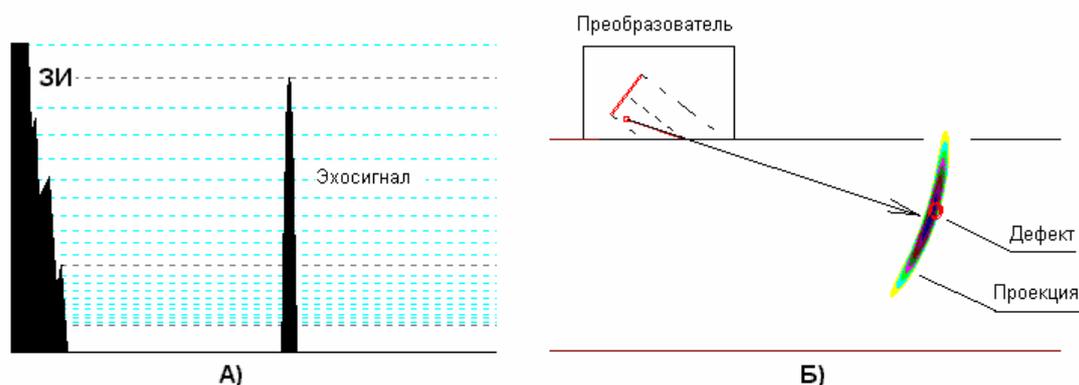


Рис. 18. Эхосигнал от дефекта (А) и его проекция в плоскости изображения объекта (Б).

Разглядывая эхосигнал (Рис.18.А) и пытаясь изобразить отражатель, можно прийти к мысли, что допустимо говорить лишь о шансах его нахождения в том или ином месте. С эхосигналом можно сопоставить только некоторую область в пространстве, в которой могут находиться отражатели. Интенсивность изображения в данной области должна характеризовать вероятность выявления отражателя. Полагая, что отражатели имеют одинаковую вероятность нахождения в любой точке пространства и одинаковую вероятность ориентации, приходим к выводу, что интенсивность изображения должна быть пропорциональна амплитуде эхосигнала $F(L)$ и пропорциональна чувствительности схемы прозвучивания $U(x, y)$. Обозначим $P(x, y)$ изображение, отражающее шансы выявления дефектов, и определим его в виде

$$P(x, y) = |F(L) * U(x, y)|,$$

Данное изображение, кроме полезной информации, содержит интерференционную составляющую, возникающую из-за волновой природы

излучения. Дальнейшая обработка изображений $P(x, y)$ с целью полной реконструкции неизбежно приведет к интерференции картин. Результирующее изображение будет содержать шумовую составляющую, так называемый спекл-шум.

Пример изображения эхосигнала от дефекта в виде шансов его выявления $-P(x, y)$ - показан на Рис.18.Б. В контексте данной работы будем называть величину $P(x, y)$ проекцией данных ультразвукового зондирования на плоскость объекта, или просто проекцией.

Рассмотрим способы представления эхосигналов в виде изображения, основанные на понятии проекции.

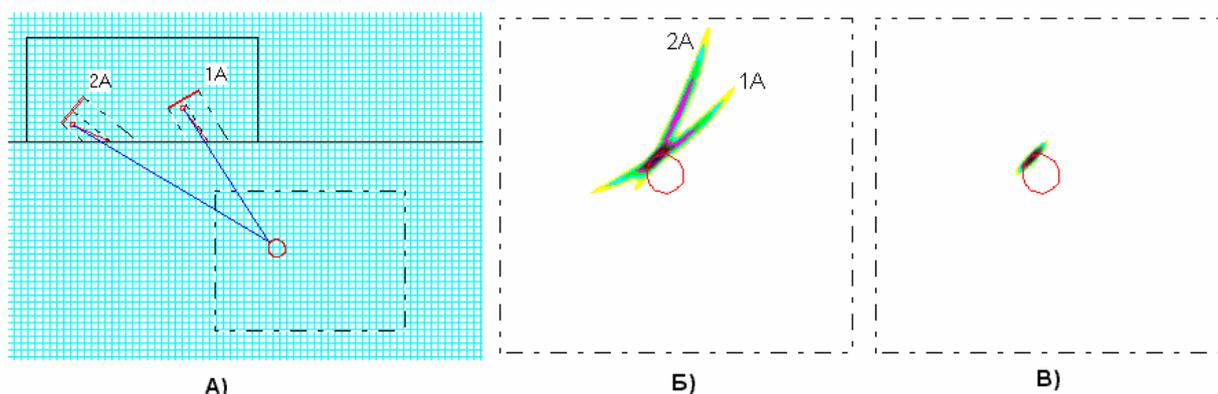


Рис. 19. Принцип построения элемента изображения дефекта.

- А) Прозвучивание дефекта ультразвуковыми преобразователями 1А и 2А.
- Б) Сумма проекций ультразвуковых сигналов.
- В) Произведение проекций.

Пусть некоторый дефект прозвучивается акустическим блоком, состоящим из двух преобразователей 1А и 2А (Рис.19. А). Каждый из преобразователей прозвучивает область, в которой находится дефект, и принимает эхосигнал от него. После соответствующей обработки эхосигналов получаем две проекции $P_{1A}(x,y)$ и $P_{2A}(x,y)$. Элемент изображения дефекта можно вычислить как сумму проекций (Рис.19. Б) или в виде произведения проекций (Рис.19. В)

$$I(x,y) = P_{1A}(x,y) + P_{2A}(x,y), \quad I(x,y) = P_{1A}(x,y) * P_{2A}(x,y).$$

Изображение дефекта, полученное в виде суммы проекций (Рис.19. Б) имеет наибольшую интенсивность в области поверхности дефекта, от которой действительно отражались ультразвуковые волны. Недостатком данной картины является высокий уровень интенсивности изображения на боковых частях проекций. Качество изображения будет повышаться при использовании большого количества преобразователей, когда производится суммирование множества проекций. Но, все-равно, на изображении будет присутствовать остаточный шум (спекл-шум). Нужно отметить, что известные методы синтеза изображений используют исключительно аддитивный принцип формирования изображений.

Мультипликативный способ синтеза (произведение проекций) дает лучшие результаты. Например, на Рис.19.В. показано изображение элемента

поверхности дефекта, полученное умножением двух проекций. Видно, что интенсивность изображения локализована в небольшой области и отсутствует спекл-шум.

Способ синтеза, основанный на умножении проекций имеет аналогии со статистической обработкой данных. Как известно, произведение вероятностей каких-либо событий характеризует вероятность совместного события, т.е. вероятность появления всех событий одновременно. Действительно, проекция понимается как распределение шансов нахождения отражателя в пространстве. Произведение проекций, также как произведение вероятностей, характеризует шансы локализации отражателя в пространстве при условии, что сигналы от него присутствуют на всех проекциях. Ясно, что при такой обработке область локализация отражателя резко сокращается. Идея мультипликативной обработки, в частности, высказана в статье [132].

Другая проблема синтеза изображений состоит в неоднозначности интерпретации эхосигналов. Продемонстрируем данное явление на примере. На рисунке 20 А показан ультразвуковой преобразователь, прозвучивающий надкорневой дефект в сварном шве толщиной 12мм. Частота пьезоэлемента 5 МГц, диаметр 6мм, угол призмы преобразователя 50° , материал призмы - оргстекло. Угол ввода преобразователя 65° , ширина диаграммы направленности 12° . Длительность эхосигнала 0,6мкс (3 периода колебаний).

На рисунке 20 хорошо видно, что дефект прозвучивается одновременно и прямыми и однажды отраженными лучами, т.к. в область прозвучивания попадает дефект и часть донной поверхности.

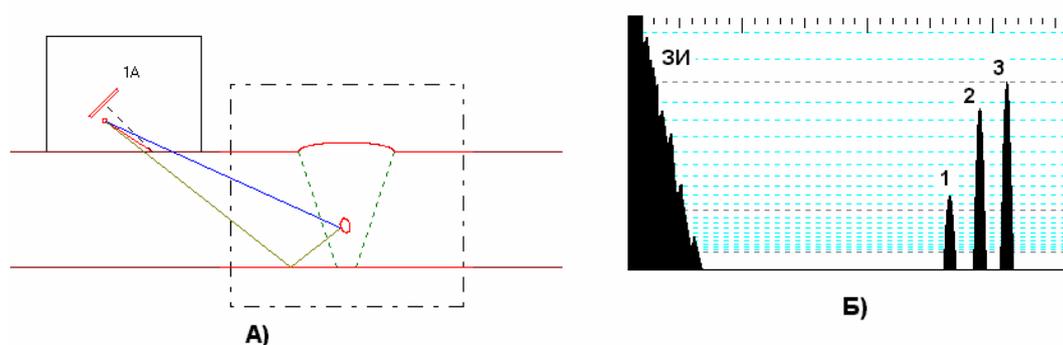


Рис.20. Формирование эхосигналов от надкорневого дефекта в стыковом сварном шве толщиной 12мм.

А) Схема прозвучивания,

Б) Вид эхосигналов (ЗИ – зондирующий импульс).

В общем случае возникает три эхосигнала (Рис. 20 Б):

1. Прямой отраженный эхосигнал,
2. Эхосигнал, отраженный от донной поверхности и затем от дефекта,
3. Эхосигнал, полученный однажды отраженными лучами.

Все три эхосигнала имеют различную задержку поскольку ультразвуковые волны проходят разный путь в процессе их формирования. Заранее неизвестно, какой способ отражения реализовался для того или иного эхосигнала. Можно попытаться представить эхосигналы в виде трех типов проекций. Тогда получим следующие частные изображения – Рис.21.

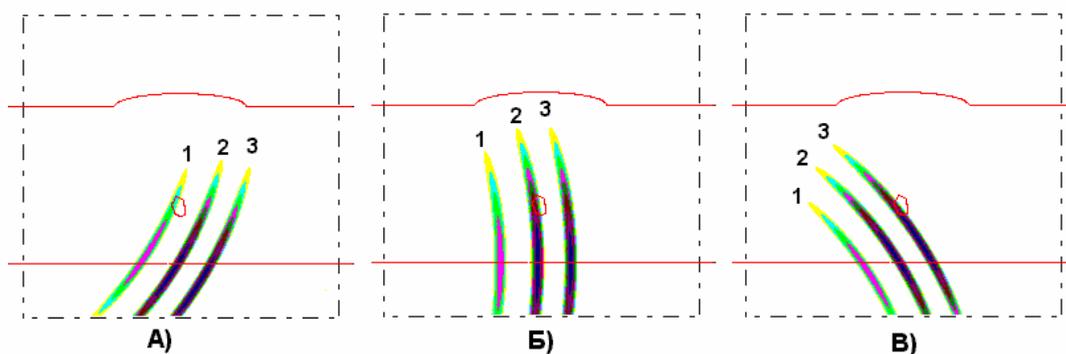


Рис.21. Проекция эхосигналов для разных вариантов прозвучивания.

- А) Прямыми лучами преобразователя,
- Б) Лучами, отраженными от донной стенки и затем от дефекта,
- В) Однажды отраженными лучами (от донной стенки).

Рисунок 21 показывает, что во всех случаях только одна из трех проекций содержит адекватную информацию об отражателе, две других проекции будут создавать ложные изображения. Неоднозначность интерпретации эхосигналов увеличивается, если применяется прозвучивание дважды отраженными лучами.

Реконструкция изображений с высокой степенью адекватности требует создания новых алгоритмов, в которых учитываются возможные варианты формирования эхосигналов. Необходимо использовать логические связи между наборами эхосигналов, отраженных от границ деталей и дефектов различной формы, размеров и местоположения. Образно говоря, нужно анализировать акустическую ситуацию при прозвучивании сварного шва. Данная задача является типичной задачей распознавания образов.

По мнению авторов, наиболее перспективным направлением в решении задач распознавания дефектов по эхосигналам является применение нейронных сетей. Последние годы резко повысился интерес к ним в связи с появлением компактных высокопроизводительных компьютеров. Вопросы применения нейронных сетей, обсуждения их возможностей, проблемы обучения сетей настолько обширны, что требуют отдельного рассмотрения. Заинтересованному читателю для начального ознакомления рекомендуем литературу [133-136].

Будем надеяться, что в недалеком будущем будут решены проблемы синтеза изображений сварных соединений и появятся ультразвуковые сканеры с высокой разрешающей способностью. Дефектоскописты смогут выдавать отчет в виде изображения сварного шва с несплошностями.

Возможно не все идеи, высказанные в данной работе, являются конструктивными. Возможно, новая технология ультразвукового контроля будет выглядеть несколько иначе. Но один факт не вызывает сомнений – будущее за системами визуализации несплошностей.

Список литературы

1. Report on the actual situation of INSTITUTE DR. FORSTER. Information for customer and friends of INSTITUTE DR. FORSTER. No.12/Dec, 1993.
2. Н.Е Маркина, В.А. Ильин, Г.Г. Газизова. НК при ремонте локомотивов и мотовагонного подвижного состава. В мире неразрушающего контроля. №4(10) декабрь 2000, С.56-58.
3. **ПБ 09-297-99.** Правила устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок с поршневыми компрессорами, работающими на взрывоопасных и вредных газах. ГП научно-технический центр по безопасности в промышленности и Госгортехнадзор России. Москва. 2000.
4. **ПБ 09-310-99.** Правила промышленной безопасности для нефтеперерабатывающих производств. ГП научно-технический центр по безопасности в промышленности и Госгортехнадзор России. Москва. 2000.
5. **ПБ 12-245-98.** Правила безопасности в газовом хозяйстве. ПИО ОБТ. Москва. 1998.
6. **РД 08-200-98.** Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. НПО ОБТ. Москва. 1999.
7. **ПБ 10-115-96.** Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. ПИО ОБТ. Москва. 1996.
8. **ИПБ 03-147-97.** Изменения и дополнения в правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. ПИО ОБТ. Москва. 1997.
9. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. ПИО ОБТ. Москва. 1996.
10. **ПБ 03-75-94.** Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. НТБ ПОТ. Москва. 1997.
11. **Изменения №1** к Правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. ПИО ОБТ. Москва. 1997.
12. **ПБ 10-14-92.** Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных машин. НПО ОБТ. Москва. 1993.
13. **ПБ 10-11-92.** Правила устройства и безопасной эксплуатации подъемников (вышек). НПО ОБТ. Москва. 1993.
14. **ПБ 03-164-97.** Правила изготовления паровых и водогрейных котлов, сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды с применением сварочных технологий. ПИО ОБТ. Москва. 1998.
15. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов с давлением пара не более 0,07 МПа (0,7 кгс/см), водогрейных котлов и водонагревателей с температурой нагрева воды не выше 388 К (115 С). НПО ОБТ. Москва. 1992.
16. **Изменения №1** “Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов с давлением пара не более 0,07 МПа (0,7 кгс/см), водогрейных котлов и водонагревателей с температурой нагрева воды не выше 388 К (115 С)”. НПО ОБТ. Москва. 1994.
17. **ПБ 03-108-96.** Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. НПО ОБТ. Москва. 1997.
18. **РД 39-132-94.** Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов. НПО ОБТ. Москва. 1994.
19. **СП 105-34-98.** Свод правил сооружения магистральных газопроводов. Свод правил по производству сварочных работ и контролю качества сварных соединений. Газпром. 1996.

20. **ПБ 09-220-98.** Правила устройства и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок. Госгортехнадзор России. Москва. 1999.
21. В.Г.Щербинский, Н.П.Алешин. Ультразвуковой контроль сварных соединений. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 496 с.
22. Dombret Ph., Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel. Nuclear Engineering and Design 131(1991), North-Holland, pp. 279-284.
23. G. Maes, Mathematical model for the development and optimization of ultrasonic transducers for non-destructive testing in the nuclear industry. MATHEMATICAL and INTELLIGENT models in system simulation: JC Baltzer AG, Scientific Publishing Co IMACS, 1991, pp. 403-40
24. G. Maes, M. Lepiuce, "Advanced procedures for the ultrasonic examination of narrow gap welds connecting the steam generator to the RCS piping", 14th Int. Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel industries, Stockholm, September 1996. [conference paper]
25. Gebhardt W.G., Electronic Beam Forming, Defect Reconstruction and Classification by Ultrasonic Phased Arrays. NON DESTRUCTIVE TESTING, Vol, 7, 1984, pp. 115-143. [book]"EPRI Phased Array Inspection Seminar ". Portland August/September 1998. [seminar proceedings)
26. A. Macovski, "Ultrasonic Imaging Using Arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, No. 4, pp. 484-495, 1979.
27. L. Azar and S. C. Whoo, "Experimental Characterization of Ultrasonic Phased Arrays for the Nondestructive Evaluation of Concrete Structures," *Materials Evaluations*, Vol. 75, No. 2, pp. 134-140, 1999.
28. G. S. Kino, Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
29. L. W. Schmerr, Jr, Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, A Modeling Approach, Plenum Press, New York, pp. 167-181, 1998.
30. L. W. Schmerr, Jr, A. Sedov, T. P. Lerch, "A boundary diffraction wave model for a spherically focused ultrasonic transducer," The Journal of the Acoustical Society of America. Vol.101, No. 3, pp. 1269-1277, 1997.
31. S. J. Song and H. J. Kim, "Modeling of Radiation Beams from Ultrasonic Transducers in a Single Medium," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 2, 2000.
32. W.Arden Smith. "Piezo-composite materials for acoustical imaging transducers". 21st International symposium on acoustical imaging, March 1994
33. E.Abittan, EDF GDL. A. Dochy, Jeumont Industries. T.Allart, Framatome. H Malletguy,CTE Nordest. "Ultrasonic Inspection of the primary pump thermal barrier flange". ECNDT CongresS, May 1998.
34. Piezo-composite materials for acoustical imaging transducers, W.ARDEN SMITH, 21st International symposium on acoustical imaging, March 1994
35. Numerical computation of the acoustical field passing through a plane interface : application to new phased-array transducers, M. EMALRANI et al., *Ultrasonics* 93, pp 197-200
36. V.V.Klyuev. Development of nondestructive testing and technical diagnostics is a basis of safety. Trends in NDE Science & Technology; Proceeding of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing, New Delhi, 8-13 December 1996. Vol. 1, pages 109-112.
37. S. Fakuda. Nondestructive evaluation and its new role in the coming century. Trends in NDE Science & Technology; Proceeding of the 14th World Conference

- on Non-Destructive Testing, New Delhi, 8-13 December 1996. Vol. 1, pages 15-24.
38. Yoseph Bar-Cohen. Emerging NDE Technologies and Challenges at the Beginning of the 3th Millennium – Part 1. NDT.Net – January 2000, Vol. 5, No. 1.
 39. ГОСТ 12.1.001-83. Ультразвук. Общие требования безопасности.
 40. ГОСТ 12997-76. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Методы испытаний.
 41. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
 42. ГОСТ 16504-74. Качество продукции. Контроль и испытания. Термины и определения.
 43. ГОСТ 15467-79 (СТСЭВ 3519-81). Управление качеством продукции.
 44. ГОСТ 20415-75. Методы акустические. Общие положения.
 45. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
 46. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.
 47. ГОСТ 23049-78. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Общие технические требования.
 48. ГОСТ 23667-85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров.
 49. ГОСТ 26266-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования.
 50. ГОСТ 23702-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.
 51. ГОСТ 21397-75. Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Основные параметры и технические требования.
 52. ГОСТ 12503-75. Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования.
 53. ГОСТ 22368-77. Контроль неразрушающий. Классификация дефектности стыковых сварных швов по результатам ультразвукового контроля.
 54. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
 55. ГОСТ 23858-79. Соединения сварные стыковые и тавровые арматуры железобетонных конструкций. Ультразвуковые методы контроля качества. Правила приемки.
 56. ГОСТ 17410-78. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии.
 57. ГОСТ 18576-85. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые.
 58. ГОСТ 21120-75. Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечения. Методы ультразвуковой дефектоскопии.
 59. ГОСТ 22727-88. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля.
 60. ГОСТ 28831-90. Прокат тонколистовой. Методы ультразвукового контроля.
 61. ГОСТ 24507-80. Контроль неразрушающий. Поковки черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии.

62. **РД 34.17.302-97** Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды. Сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения. (ОП 501 ЦД - 97). Москва. НПП «Норма». 1997.
63. **РД 34 15.027-93 (РТМ-1С-93)**. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций. НПО ОБТ. Москва. 1994.
64. **РД 34 17.310-96**. Сварка, термообработка и контроль при ремонте сварных соединений трубных систем котлов и паропроводов в период эксплуатации. НПО ОБТ. Москва. 1997.
65. **РД РОСЭК 001-96** Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения.
66. Технологическая инструкция по ультразвуковому контролю сварных соединений ходовых рам при обследовании башенных кранов типа КБ-403. ТИ РОСЭК-001-96.
67. **И-2-МВТУ-81**. Инструкция по ультразвуковому контролю сварных узлов грузоподъемного оборудования.
68. Инструкция по контролю сварных соединений штанг подвесок БелАЗов ультразвуковым методом. Свердловск. 1977.
69. **ОСТ 26.2044 – 83** Швы стыковых и угловых сварных соединений сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика ультразвукового контроля.
70. **ВСН 012-88. Ч.1**. Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ.
71. **ОСТ 36-75-83**. Сварные соединения трубопроводов. Ультразвуковой метод. Минмонтажспецстрой СССР. 1983.
72. **ОСТ 108.885.01-83**. Трубы для энергетического оборудования. Методика ультразвукового контроля. (Трубы по ТУ 14-3-460-75).
73. **СТП 0112-701-81**. Машины и аппараты химического машиностроения. Ультразвуковой контроль.
74. **РДИ 38.18.016-94**. Инструкция по ультразвуковому контролю сварных соединений технологического оборудования. ВНИКТИ Нефтехимоборудование. Волгоград. 1994.
75. **РД 2730.940.103-92**. Котлы паровые и водогрейные, трубопроводы пара и горячей воды. Сварные соединения. Контроль качества. НПО ЦНИИТМАШ. Москва. 1992.
76. **РД 10-210-98**. Методические указания по проведению технического освидетельствования металлоконструкций паровых и водогрейных котлов. Госгортехнадзор России. Москва. 1998.
77. **ПН АЭ Г-7-010-89**. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила приемки. Энергоатомиздат. Москва. 1991.
78. **ПН АЭ Г-7-014-89**. Унифицированные методики контроля материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть 1. Контроль основных материалов (полуфабрикатов). Госатомэнергонадзор СССР. Москва. 1990.
79. **ПН АЭ Г-7-030-91**. Унифицированные методики контроля материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой

- контроль. Часть 2. Контроль сварных соединений и наплавки. Госатомэнергонадзор СССР. Москва – ЦНИИ атоминформ. 1992.
80. ПН АЭ Г-7-032-91. Унифицированные методики контроля материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть 4. Контроль сварных соединений из сталей аустенитного класса. Госатомэнергонадзор СССР. Москва – ЦНИИ атоминформ. 1992.
 81. ОСТ 95-39-91. Оборудование для работы с радиоактивными средами. Сварные соединения. Правила приемки. Москва. 1991.
 82. Анненков А.С., Баранов В.Ю., Голев В.А., Петров А.Е., Полевой А.Г., Щербаков О.Н., Яровой А.А. и др. Средства неразрушающего контроля изделий серийного производства. Тезисы конференции "Неразрушающий контроль в науке и индустрии - 94" Москва, 31 июня - 2 июля, 1994, с.64-66.
 83. Высокопроизводительные технологии неразрушающего контроля изделий в потоке производства. Сборник трудов XV Петербургской конференции "Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций" Санкт-Петербург, 30 мая - 1 июня, 1995, с. 137-139.
 84. Автоматизированный ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов и металлоконструкций. Система "СКАРУЧ". Тезисы докладов 14-ой Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика" Москва, 23-26 июня, 1996, с. 453.
 85. Оперативная система контроля сварных соединений. УИУ серии "СКАНЕР" (модель "СКАРУЧ"). Тезисы докладов XVII Уральской региональной конференции "Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами" Екатеринбург, 15-16 апреля, 1997, с. 27-28.
 86. Новое оборудование для ультразвукового контроля сварных соединений. "Сварочное производство", 1998г., с.41-42.
 87. Probability of detection.- Materials Evaluation - The Journal of American Society for Nondestructive Testing, Vol 58, No 4, 2000, p.503 - From the President / Bob Doggart, 1999-2000 ASNT President
 88. Reducing the influence of human factors on the reliability of manual ultrasonic weld inspection.-INSIGHT The journal of The British Institute of Non-Destructive Testing Vol 37, No10, 1995, pp. 788-791 /G.Passi, M.Kritsky, Y.Shoef
 89. New defect recording system.- INSIGHT - The Journal of British Institute of Non-Destructive Testing, 1996, Vol.38, N4, p.260
 90. Reducing the influence of human factors on the reliability of manual ultrasonic weld inspection.-Internet publication / <http://www.ndt.net/article/passi/passi.htm> / issued May, 1996 / G.Passi, M.Kritsky, Y.Shoef
 91. Ultrasound Imaging System.- Pat. 5524627 (USA), Published, June 11, 1996 / G.Passi
 92. I2-Sonic vollstndige Dokumentation dank kontinuierlicher Aufzeichnung der Prfkopfbewegung und Ankopplung bei der manuellen Schweinahtprfung. - DGZfP Jahrestagung 1997, Zerstrungsfreie Materialprfung, Dresden, 5-7 Mai, 1997 [62] / M.Berke and W.-D.Kleinert
 93. High Reliability Manual Ultrasonic Inspection.- 7 th European Conference on Non destructive testing, Copenhagen, May 26-29, 1998. Book of abstracts, p.471 / G.Passi, M.Kritsky, Y.Shoef

94. High Reliability Manual Ultrasonic Inspection.- Internet publication /<http://www.ndt.net/article/ecndt98/ut/471/471.htm> / issued December, 1998 / G.Passi, M.Kritsky, Y.Shoef
95. An Ultrasonic Imaging System. - PCT - International Application #WO99/04279, Published January, 28, 1999, 30 p. / G.Passi
96. High-Reliability Manual Ultrasonic Inspection.- INSIGHT - The Journal of British Institute of Non-Destructive Testing, 1999, Vol.41, N4, p.225-231 - Cover Story, p.217 / G.Passi, M.Kritsky, Y.Shoef
97. Ultrasonic Imaging System. - Pat. 5952577 (USA, Published, Sep 14, 1999) / G.Passi
98. Another step forward in ultrasonic testing.- The Echo - Krautkramer Edition, No 38, July 1999, p.38-39 /E.Zimmermann
99. Г. Пасси ISONIC – высоконадежный ультразвуковой контроль при сканировании вручную. – Дефектоскопия, №1, 1998, с. 48-65.
100. В.Т.Пронякин, Н.К.Рыбаков, Ю.Н.Панченко Ультразвуковая дефектометрия сварных соединений тонкостенных изделий. – Дефектоскопия, №4, 1997, с. 18-22.
101. В.Т.Пронякин, Н.К.Рыбаков, Ю.Н.Панченко Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений твэлов. – Атомная энергия, №79, вып.3, сентябрь 1995, с.236-237.
102. А.А.Марков, О.Ф.Захаров, В.В.Мосягин. Применение развертки типа «В» для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов. – Дефектоскопия, №6, 1999, с. 78-92.
103. Д.Б.Бабилов, А.Г.Кириллов, С.Ю.Ксенофонтов, М.Б.Прудников, А.М.Рейман, А.В.Шишков. Визуализация дефектов, обнаруженных в сварных швах рельсов при ультразвуковом контроле. - Дефектоскопия, №6, 1999, с. 93-97.
104. G.T. Herman, A.K. Louis, F. Natterer (Eds.), *Mathematical Methods in Tomography*, Proceedings, Oberwolfach 1990, Springer Verlag, ISBN 3-540-54970-6.
105. A. C. Kak, M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, 1988, ISBN 0-7803-0447-0.
106. Z. Gumienny, M. Pluta, W. Bicz, D. Kosz: Synthetic aperture acoustic microscope for evaluation of fingertip peripheral skin structure, *SPIE Vol. 2390*.
107. W. Bicz, Z. Gumienny, M. Pluta: Ultrasonic Sensor for Fingerprint Recognition, *SPIE Vol. 2634*.
108. Z. Gumienny, M. Pluta, W. Bicz, D. Kosz: ULTRASONIC SETUP FOR FINGERPRINT PATTERNS DETECTION AND EVALUATION, *Acoustical Imaging, Vol. 22*, Plenum Press 1996.
109. B. T. Kuri-Yakub and C-H Chou: "Acoustic microscope lenses with shear wave transducers", *IEEE 1986 Ultrasonic Symposium*, pp.741 - 744, IEEE, New York, (1986)
110. D. A. Davids and P. Y. We and D. Chizhik: "Restricted aperture acoustic microscope lens for Rayleigh wave imaging", *Appl. Phys., Lett.*, 54(17), pp. 1639 - 1641, (1989)
111. A. Atalar, H. Koymen, and L. Degertekin: "Characterization of layered materials by the Lamb wave lens," in *Proc. of IEEE 1990 Ultrasonics Symposium*, pp. 359 - 362, (1990)

112. A. Atalar, I. Ishikawa, Y. Ogura and K. Tomita: "Anisotropy sensitivity of an acoustic lens with slit aperture," in Proc. of IEEE 1993 Ultrasonics Symposium, pp. 613 - 616, (1993)
113. S.E. Bougaenko, A.A. Arefiev, B.P. Strelkov, RDIPE; All. Arzhaev, ECS MAE RDIPE; A. K. Vopilkin, V.G. Badalyan, D.V. Grebenikov, D.S. Tikhonov "Augur 4.2" ultrasonic system: features, reliability, applications to on-site expert examination of primary circuit piping. [NDTnet](#) 1998 April, Vol.3 [No.4](#)
114. Arzhaev A.I., Kiselyov V.A., Badalyan V.G., Vopilkin A.Kh., Strelkov B.P., Vanukov V. N., Aladinsky V.V., Makhanev V.O. Field application of *Augur* ultrasonic system during RBMK NPP Unit ISI and its impact on pressure boundary integrity. In: Ageing of Materials and Methods for the Assessment of Lifetimes of Engineering Plant, R.K. Penny (Ed.), 1997, P. 97 - 104.
115. Arzhaev A.I., Bougaenko S.E., Denisov I.N., Aladinsky V.V., Makhanev V.O. Technical basis and software development for flaw assessments in NPP pipeline welds. In: Ageing of Materials and Methods for the Assessment of Lifetimes of Engineering Plant, R.K. Penny (Ed.), 1997, P. 63 - 68.
116. Arzhaev A.I., Bougaenko S.E., Smirnov Yu.I., Aladinsky V.V., Makhanev V.O., Saburov Yu. Residual stress modelling and analysis for INPP primary circuit pipeline welds. To be published in the Transactions of SMIRT 14 Conference, Lyon, 17 - 22 August, 1997.
117. A.CHAHBAZ, M.BRASSARD AND A. PELLETIER Mobile Inspection System for Rail Integrity Assessment. Tektrend International Inc.
118. Maseri, H., D. MacLauchlan, and G. Alers, "Application of EMAT's to In-Place Inspection of Railroad Rails." DARPA/AFWAL Review of Progress in Quantitative NDE, Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, OH, 1981 544-547.
119. X. J. Wu, A.K. Koul and L. Zhao, "A New Approach to Heat Damage Evaluation for 7xxx Aluminum Alloy", Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 42, No.2, pp. 93-101, June 1996.
120. Svilainis L. Ultrasonic non-destructive testing system IZOGRAF. Report No: LiTh-IKP-R-866. Linkoping university. 1995. P.57.
121. Hans Ole Olsen, Lars Vesth* and Leif Jeppesen. Automated Ultrasonic Examination of Inclined Nozzle Welds Using Robot and 3D Reconstruction. [NDT.net](#) - October 1998, Vol.3 [No.10](#)
122. V.H. Patankar - Bhabha Atomic Research Centre 'India; S.R. More, A.A. Agashe, P.Jyothi, V.M. Joshi-Bhabha Atomic Research Centre 'India. Multichannel Ultrasonic Imaging System ULTIMA+ 100M8 for NDE of Fabricated Parts. 15th World Conference on Non-Destructive Testing 15-21 October 2000 in Rome.
123. P. D. Corl, G. S. Kino, C. S. DeSilets, and P. M. Grant, "A digital synthetic focus acoustic imaging system," in Acoustical Imaging, vol. 8, A. F. Metherell, Ed. New York: Plenum, 1980.
124. A.W. Elbern, L. Guimarrès Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restoration. - [NDTnet](#) - August 2000, Vol. 5 No. 08.
125. DSP Doctor, S.R. Hall, T.E., Reid, L.D. "SAFT - The Evolution of Signal Processing for Ultrasonic Testing" - [NDT International](#), Vol.19 No. 3 - 1986
126. T. E. Hall, L. D. Reid, and S. R. Doctor, "SAFT-UT (Synthetic aperture focusing technique for ultrasonic testing) real-time inspection system: Operational principles and implementation," 1988.

127. E. G. Williams and J. D. Maynard, "Numerical evaluation of the Rayleigh integral for planar radiators using the FFT," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 72, pp. 2020-2030, 1982.
128. H. D. Collins, R. P. Gribble, V. L. Crow, R. W. Gilbert, and R. L. Wilson, "The design, construction and demonstration of a prototype digital processor for a production prototype pressure vessel imaging inspection system," EPRI RP606-8, pp. 1-12, 1983
129. B. P. Hildebrand and K. A. Haines, "Holography by scanning," J. Opt. Soc. Amer., vol. 59, 1986.
130. J. Kostka, K.J. Langenberg, K. Mayer: Improved Flaw Imaging Applying Elastodynamic Far-Field Fourier Inversion (EL-FT-SAFT). Berichtsband der DGZFP zur 2nd International Conference on Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics, Minsk, Belarus (1998) 64
131. V. Schmitz, M. Kröning, K.J. Langenberg: Modelling and Visualization of Ultrasonic Testing Situations. Proc. 12th International Conference and Exhibits on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, October 11-13, Philadelphia/Pennsylvania, USA (1993)
132. А.А.Туржанский. Исследование вероятностных характеристик обнаружения и помехоустойчивости системы акустического изображения при мультипликативной обработке сигналов. - Дефектоскопия, №6, 1993, с. 10-17.
133. Ф.Уоссермен, Нейрокомпьютерная техника, М.,Мир, 1992.
134. Итоги науки и техники: физические и математические модели нейронных сетей, том 1, М., изд. ВИНТИ, 1990.
135. Artificial Neural Networks: Concepts and Theory, IEEE Computer Society Press, 1992.
136. Richard P. Lippmann, An Introduction to Computing with Neural Nets, IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine, April 1987.