

Ультразвуковой дефектоскоп - томограф **A1550 IntroVisor**. Заглянуть в металл. Теперь это просто.

Авторы: С.Г. Алёхин, А.В. Бишко, А.В. Дурейко, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, Н.Ю. Соколов, В.Г. Шевалдыкин

Источник: www.acsys.ru

Введение

Идея звуковидения родилась практически одновременно с изобретением ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии С.Я. Соколовым и в настоящее время получила прекрасное воплощение в медицинской диагностике, подводной локации, геофизике. Сейчас уже никого не удивляют трехмерные (3D) образы плода человека на экранах ультразвуковых медицинских томографов, картины донной поверхности водоемов и косяков рыб, формируемые сонарами, карты подземных месторождений, обнаруженных методами сейсмолокации.

В области промышленного НК, где наиболее массовыми объектами контроля являются металлические конструкции и сварные соединения, применение подобных томографических подходов является очень заманчивой перспективой. Ведь человеку гораздо проще и понятнее анализировать условный образ дефекта в сечении сварного шва, чем интерпретировать амплитуду и координаты одиночного эхосигнала (А-скана), получаемого на экране типового УЗ дефектоскопа. Поэтому в данном направлении уже несколько десятков лет различными организациями ведутся работы по созданию томографических систем для дефектоскопии металлических и композитных конструкций.

Но при очень широком внедрении различных способов и методов УЗ контроля в промышленность [1], томографические системы для технической диагностики массового распространения не получили. Они используются, как правило, для экспертной диагностики ответственных узлов, в автоматизированных установках контроля типовых изделий, специализированных системах. Ограниченность их применения обусловлена рядом факторов – дороговизной, громоздкостью или невысокой производительностью подобных систем. А в широкой практике до сих пор для эксплуатационного контроля сварных швов и металлических конструкций используются десятки тысяч УЗ дефектоскопов ручного контроля с отображением А-сканов.

В последние годы ситуация стала меняться. Появилось несколько моделей мобильных УЗ томографов для ручного контроля, построенных на базе фазированных антенных решеток (АР) [2]. На сегодняшний день можно перечислить следующие представленные на рынке модели: «OmniScan» (компания «R/D Tech»), «X-32» (компания «Harfang Microtechniques inc»), «Phasor XS» (компания «GE Inspection Technologies»). В этом ряду находится и продукция российской компании – малогабаритный томограф на базе АР для УЗ ручного контроля «A1550 IntroVisor™» (компания «Акустические Контрольные Системы»).

Внедрение подобных устройств в массовую практику контроля находится на начальном этапе. И целью данной статьи является ознакомление широкого круга потенциальных пользователей с возможностями, особенностями построения и эксплуатации, достоинствами и недостатками нового поколения оборудования для НК – малогабаритных УЗ томографов и рассказ об особенностях отечественного прибора «A1550 IntroVisor™».

Основные сведения и типовые решения

Перед описанием томографических систем следует определить их принципиальные отличия от типовых УЗ приборов, отметить наиболее существенные особенности и раскрыть сущность часто применяемых терминов и понятий.

Следует отметить, что рассматриваемые решения ограничены областью высокочастотной томографии, ориентированной на контроль металлических конструкций и некоторых пластиков, и в данной статье не затрагиваются вопросы низкочастотной томографии, используемой, например, при контроле бетона, композитных материалов и длинномерных конструкций.

Томография

Термин «томография» происходит от греческого «tomo – слой» и «grapho – пишу» и используется для обозначения систем НК, обеспечивающих послойную визуализацию внутренней структуры контролируемых конструкций с использованием методов решения обратных задач.

Применительно к УЗ средствам НК под томографическими системами общепринято понимаются устройства, обеспечивающие не только представление результатов в виде двумерного сечения, но и использующие в качестве преобразователей АР в сочетании с когерентными (синфазными) способами формирования изображения из набора эхосигналов.

Антенная решетка

Набор электроакустических преобразователей (как правило, пьезопреобразователей), конструктивно объединенных в один акустический блок, называют АР. Различаются двумерные матричные, круговые сегментные и линейные АР.

В практике наибольшее распространение получили АР, которые представляют собой набор однотипных пьезоэлементов, установленных вдоль одной линии эквидистантно (равномерно) на общем протекторе (рис.1) и развязанных между собой электрически и акустически. Как и в конструкциях обычных преобразователей, пьезоэлементы демпфируются (один демпфер показан условно). В сущности, АР является набором независимых преобразователей, конструктивно объединенных в одном корпусе. Но за счет совместной работы этих преобразователей (элементов АР) удается управлять интегральным лучом решётки.

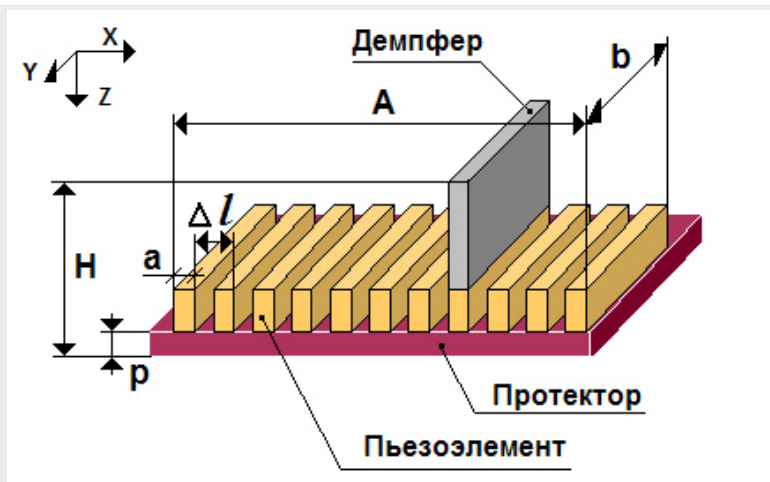


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции линейной эквидистантной АР.

В направлении оси Y (ширины АР) каждый из элементов имеет такие же направленные свойства, как и обычный преобразователь того же размера (типичный размер от 5 до 20 мм).

Но в направлении X, в котором и выполняется формирование управляемого УЗ луча, каждый из элементов имеет размер (апертуру) соизмеримый или меньший длины волны УЗ колебаний. Физический размер элементов может составлять величину от единиц до десятых долей миллиметра в зависимости от рабочей частоты, назначения и варианта конструкции. Такие элементы называются малоапертурными.

Общее число элементов в решетке может быть от 8 до 256 и более. Малое количество элементов не обеспечивает достаточно качественной реконструкции изображений, а большое приводит к излишнему усложнению и удорожанию конструкции. Дополнительным ограничением для решеток с большим количеством элементов и, следовательно, большой физической апертурой (более 50 мм) является трудность обеспечения акустического контакта решетки по всей её рабочей поверхности на реальных металлических конструкциях.

Свойства малоапертурных преобразователей

Основным отличительным свойством малоапертурного преобразователя (МАП) является формирование при излучении (и чувствительность при приёме) нескольких типов УЗ волн с широкой диаграммой направленности. На рис. 2 схематично отображены диаграммы направленности различных типов волн, формируемых МАП: продольной (L), поперечной с вертикальной (относительно поверхности) поляризацией (SV) и поверхностной волны Релея (R). Диаграммы симметричны относительно оси апертуры. Подробно эти особенности МАП описаны в работах [3–5], где они теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены.

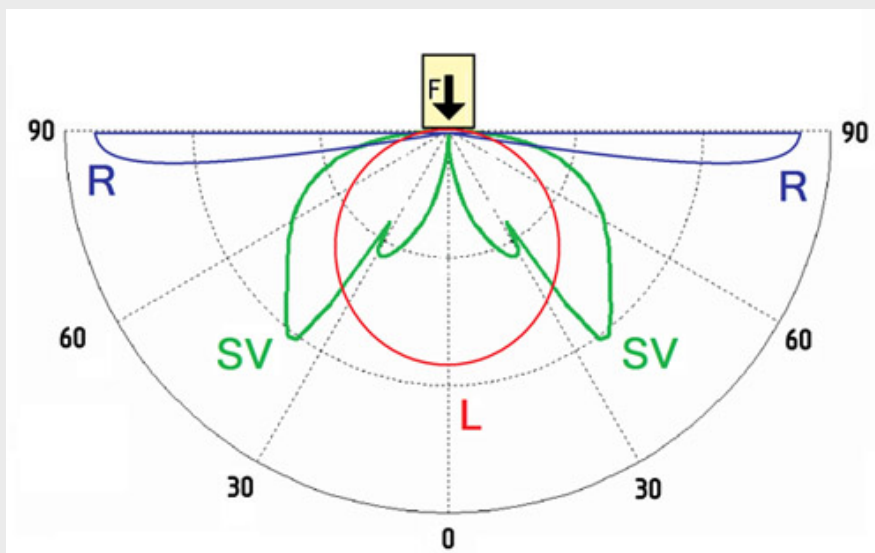


Рис.2. Типы волн и диаграммы направленности, формируемые одиночным малоапертурным преобразователем.

Если увеличивать апертуру МАП (параметр «a» на рис.1), то возрастает эффективность излучения продольной волны, а относительный уровень поперечной волны и волны Релея падают, и при этом диаграмма направленности продольной волны сужается.

Основное свойство МАП, используемое в большинстве зарубежных УЗ томографов – способность излучать и принимать сигналы продольной волны в широком диапазоне углов.

Методы управления лучом антенной решётки и получения сечений

Суммарная диаграмма направленности АР формируется как суперпозиция (линейное сложение) диаграмм совместно работающих МАП с учетом управляемого фазового распределения (фашировки) возбуждающих сигналов, поэтому в широком употреблении

используется термин «фазированные антенные решетки». Согласно принципу взаимности аналогичное суммирование происходит и при приёме сигналов, и далее для упрощения описывается только процедура излучения.

На практике используются линейный и фокусирующий способы фазировки, которые достаточно широко описаны в литературе.

При линейной фазировке на группу элементов АР подаются возбуждающие импульсы с линейно нарастающей от элемента к элементу задержкой, что обеспечивает формирование наклонного луча. Изменяя распределение задержек, можно изменять наклон суммарного луча. Последовательно зондируя, меняя наклон луча и отображая для каждого положения луча эхосигнал в яркостной форме, после выполнения полного цикла зондирований получают результирующее изображение в форме сегмента. Линейная фазировка оптимальна для дальней зоны (для расстояний больше десяти апертур «А» АР), а на меньших расстояниях разрешение и чувствительность ухудшаются, что проявляется в формировании образов дефектов в форме полосок, а не точек. При этом данный способ позволяет осуществлять формирование образов сечений наиболее производительно (до 100 кадров в секунду).

При фокусировке относительная задержка зондирующих сигналов формируется по более сложному закону (для упрощения можно считать параболическому), за счёт чего обеспечивается синфазное сложение в одной точке пространства излученных импульсов от всех элементов АР. Условия оптимальности для обеспечения чувствительности и разрешения выполняются в небольшой фокусной области. Поэтому для реконструкции одного полного сечения необходимо разбить его на области и последовательно выполнить зондирования, фокусируя УЗ луч в каждую из областей. В иностранной литературе этот метод обозначается как DDF (Dynamic Depth Focusing). Этот способ обеспечивает наилучшие результаты по пространственному разрешению и чувствительности, но производительность при этом существенно ниже, чем в предыдущем варианте.

Следует отметить, что в существующих томографах одновременно работают не все элементы АР, а ограниченное число (варианты 8 / 16 / 32 элементов), что обусловлено соответствующим количеством параллельных каналов в приборе. Это приводит к необходимости виртуального «перемещения» активной группы элементов с помощью коммутаторов вдоль полной апертуры АР (см. рис. 3).

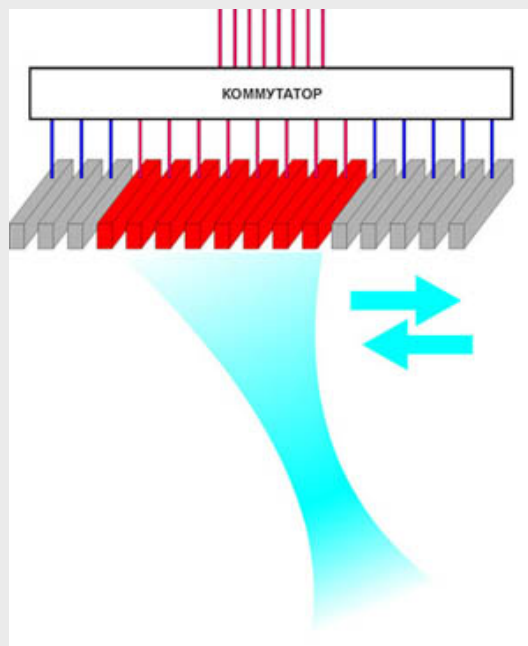


Рис.3. Использование активной группы элементов в полной апертуре АР.

АР с тонким протектором, как и прямые преобразователи, работают, как правило, на продольных волнах и имеют сектор сканирования до ± 50 . Для работы на поперечных волнах решётки продольных волн устанавливают на призмы из оргстекла, что позволяет формировать сектор сканирования в диапазоне углов от 35° до 75° [2].

Функциональная схема томографа

Практически все известные УЗ томографы (технические, медицинские) построены по однотипной функциональной схеме (рис. 4).

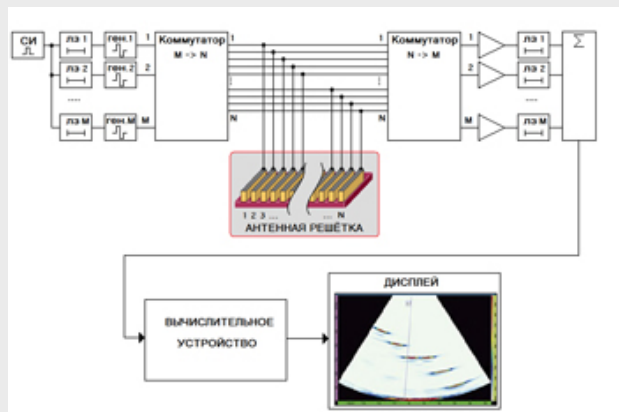


Рис.4. Функциональная схема УЗ томографа.

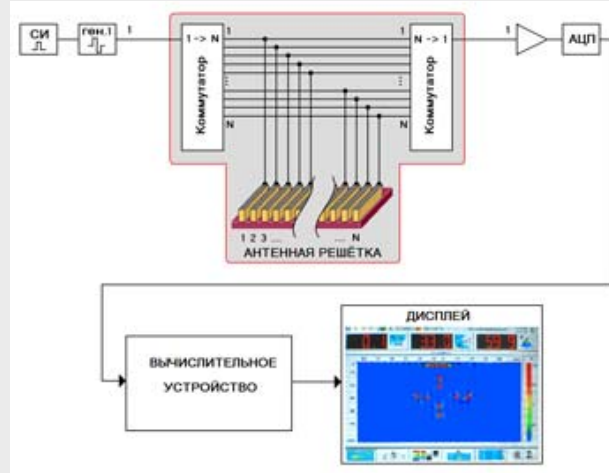


Рис.5. Функциональная схема УЗ томографа «A1550 IntroVisor™».

Фактически томограф является многоканальным дефектоскопом, имеющим M независимых каналов. В каждом из каналов имеется программируемая линия задержки и отдельный генератор зондирующих импульсов. В приёмной части, соответственно, в каждом канале имеются предварительный усилитель аналого-цифровой преобразователь и цифровая программируемая линия задержки. Выходы всех приёмных каналов объединяются в сумматоре, на выходе которого формируется сигнал, соответствующий текущему углу ввода (в цифровом виде).

Так как число элементов решётки, как правило, превышает число каналов томографа ($N > M$), то выходы генераторов и входы приёмников соединяются с элементами АР через многоканальные коммутаторы для подключения требуемой группы элементов антенны к каналам прибора. Обычно все электронные схемы размещаются в корпусе прибора, а решётка соединяется с ним многожильным кабелем.

Выход сумматора соединен с вычислительным устройством, которое обеспечивает преобразование систем координат (из полярной в декартову) для корректного отображения образа сечения на экране дисплея. Кроме того, оно выполняет оперативное управление линиями задержки и другими узлами томографа.

Возможности и ограничения

Описанные решения положены в основу практически всех малогабаритных УЗ томографов для промышленного контроля, производимых западными компаниями.

Главное достоинство этих приборов – возможность оперативной визуализации внутренней структуры металлов и пластиков в мобильном варианте, позволяющая упростить методологию УЗ контроля и повысить его производительность. Это свойство значительно облегчает контроль и упрощает интерпретацию результатов.

Но необходимо видеть ограничения и недостатки, присущие приборам данного типа.

Очевидно, что реконструируемые образы не полностью эквивалентны реальным геометрическим образам дефектов и отражателей, а получаются с учетом волновой природы УЗ колебаний. Они состоят в основном из набора «блестящих точек», формируемых отражающими элементами материала, в качестве которых могут выступать нормально ориентированные к лучу поверхности, угловые отражатели, точечные и тонкие протяженные отражатели, границы трещин, поверхности с диффузным отражением и т.п. Поэтому интерпретация образов наблюдаемых на экране томографа все-таки требует определенной подготовки оператора. И необходимо развитие методологической базы, создание специализированных методик стандартизирующих процедуру поиска дефектов и интерпретации результатов с учетом их томографического характера.

Как правило, многоканальный дефектоскоп сложнее, габаритнее и тяжелее обычного дефектоскопа вследствие большего числа каналов. Пропорционально их числу увеличиваются энергопотребление прибора, габариты аккумулятора и самого прибора.

Использование классических наклонных призм, устанавливаемых на АР, для получения поперечных волн – с одной стороны удешевляет конструкцию, а с другой – увеличивает мертвую зону, т.к. очень трудно добиться малой реверберации колебаний в призме.

Необходимость применения экранированных многожильных кабелей снижает надежность и удорожает конструкцию. Кабель дефектоскопа, как известно, является одним из самых часто отказывающихся элементов. Он постоянно подвергается перегибам, скручиваниям, растяжениям в условиях широкого диапазона температур. В кабеле, соединяющим АР с электронным блоком томографа, может содержаться под общей оболочкой до 64-х очень тонких и независимо экранированных проводов. Отказ одного приводит к необходимости замены всего кабеля, который жестко соединен с АР и специализированным многоконтактным разъёмом, что существенно увеличивает эксплуатационные расходы.

Применяемые алгоритмы фазировки не оптимальны для решения задач поиска и идентификации дефектов, а использование алгоритма динамической фокусировки ограничивает область контроля при сохранении достаточной производительности и усложняет управление прибором.

Но главным сдерживающим фактором внедрения этого поколения приборов является цена, которая в настоящее время может составлять от нескольких десятков тысяч долларов и в различных вариантах комплектации доходящая до нескольких сотен тысяч.

Малогабаритный томограф A1550

Понимая перспективность томографического направления, в нашей компании проводились и проводятся работы по созданию УЗ

томографов различного назначения. Используя результаты и апробированные решения, которые были получены при разработках нескольких типов УЗ низкочастотных томографов для контроля бетона, классических высокочастотных толщиномеров и дефектоскопов и, применяя уникальные технологии производства преобразователей, нашими инженерами и учёными был разработан малогабаритный ручной УЗ томограф для контроля металлов и пластиков, получивший имя «A1550 IntroVisor™». Он отличается набором уникальных свойств и особенностей, описанных ниже, которые выделяют его из ряда аналогичных приборов и позволяющие, как нам кажется, лучше решать проблемы потребителей и быстрее внедрить этот новый класс приборов в широкую практику.

Формулировка требований

Рассматривая ситуацию с точки зрения специалиста по неразрушающему контролю, эксплуатирующего данные приборы, можно сформулировать следующие требования к УЗ томографу для ручного контроля:

- главное требование – прибор должен обеспечивать формирование изображений сечений контролируемого объекта в реальном масштабе времени (более 20 кадров в секунду);
- возможность использования либо поперечных волн (сварные швы), либо продольных (основной металл) с перекрытием диапазона углов, используемых в типовых методиках УЗ контроля;
- параметры чувствительности и разрешения должны быть лучше, чем у типового УЗ дефектоскопа, т.е. луч должен фокусироваться в каждую точку сечения;
- массогабаритные характеристики прибора должны быть соизмеримы с характеристиками одноканального дефектоскопа при условии автономной работы не менее 8 часов;
- прибор должен быть простым в настройке и использовании;
- стоимость прибора при серийном выпуске должна быть значительно ниже стоимости западных аналогов, а в перспективе приближаться к стоимости типовых УЗ дефектоскопов.

Концепция построения

Анализируя существующие решения и отталкиваясь от собственного опыта разработки томографических систем, специалистами нашей компании была предложена и реализована концепция построения малогабаритного томографа, отличающаяся от вышеописанных решений и удовлетворяющая сформулированным требованиям.

Принципиальным отличием является отказ от физического суммирования в теле контролируемого материала УЗ лучей (акустических полей) от отдельных элементов АР и переход к виртуальному (в памяти компьютера) суммированию и формированию образа сечения в соответствии с принципом линейной суперпозиции.

Это означает, что в отдельный момент времени происходит излучение и приём сигнала только от одной пары элементов. Методом перебора всех пар получается полный набор векторов эхосигналов, и далее компьютером выполняется взаимная обработка этих сигналов по алгоритму SAFT-C [6,7] и реконструкция сечения, что эквивалентно физической фокусировке УЗ луча в каждую точку визуализируемого сечения [8], а не в несколько областей, как при методе DDF.

Данный подход позволяет резко упростить аппаратную часть томографа, сделав его одноканальным и убрав линии задержки, что приводит к уменьшению потребления, габаритов, массы и себестоимости прибора. Соответствующая функциональная схема приведена на рис. 5.

Дополнительным усовершенствованием является перенос коммутаторов в корпус АР. За счёт использования современных компонентов и технологий, габариты решетки получаются соизмеримыми с типовым наклонным УЗ пьезопреобразователем. При этом упрощаются и удешевляются кабель и разъём, соединяющий АР с электронным блоком, что увеличивает надёжность этих элементов. Число элементов М в самой АР ограничивается лишь соображениями физической и конструктивной целесообразности и производительностью вычислительной системы. Для разработанного варианта прибора допустимо использование АР с числом элементов от 16 до 64-х и более при возможности обработки данных от всех сочетаний элементов, что при оптимальном выборе параметров системы значительно перекрывает большинство практических задач и обеспечивает требуемое качество работы томографа в целом.

Отдельным фактором, повышающим качество реконструируемого изображения, является возможность оптимальной обработки каждой реализации эхосигнала до её суммирования с остальными. Это позволяет за счёт специальных алгоритмов учета диаграммы направленности каждого МАП минимизировать мёртвую зону, расширить угол обзора, работать с использованием нескольких типов волн, оптимизировать количество элементов и размер отдельного элемента АР.

Ограничительными факторами предложенного подхода являются необходимость увеличения частоты зондирования (до 10 кГц), что может привести к появлению объёмной реверберации УЗ колебаний в контролируемом объекте, и значительное увеличение объема вычислительных операций.

Но данные проблемы не являются непреодолимыми. Устранение реверберации достигается за счет использования принципа асинхронного зондирования и оптимизации числа элементов, а увеличение производительности вычислительной системы достигается известными методами за счет конвейерной обработки данных специализированными процессорами и оптимизации процедур вычислений методами математики.

Варианты исполнения АР

Важнейшей частью томографа является АР. Её свойства во многом определяют качество реконструируемого сечения, выраженное в уровне помех, протяженности мёртвой зоны, углах обзора, подавлении паразитных сигналов и др. Разработка конструкции и отработка технологии производства данных изделий является длительной и дорогостоящей процедурой, требующей специального оборудования, материалов, конструктивных решений и глубокого понимания физики формирования и распространения УЗ колебаний.

Основными параметрами решетки являются тип формируемых колебаний (продольные, поперечные, многомодовые), частотные свойства (центральная частота, ширина полосы пропускания, форма импульса) и конструктивные (число и размер элементов, ширина и длина апертуры антенны).

Для томографа «A1550 IntroVisor™» были разработаны несколько типов АР, ориентированных на различные области применения:

- AP продольных волн для контроля основного тела металлических и пластиковых конструкций;
- AP поперечных волн для контроля сварных швов (в том числе и аустенитных сталей);
- AP многомодовая (работающая и на продольных и на поперечных волнах) для исследовательских целей, отработки новых методик контроля, изучения свойств материалов.

Все типы AP являются широкополосными многоэлементными с центральной частотой порядка 3 МГц. За счёт использования эффективного демпфирования ширина полосы пропускания может превышать 100%. При этом длительность УЗ импульса составляет 1,0 - 2 периода центральной частоты. Данное свойство позволяет электрическим путем (формой возбуждающего сигнала и фильтрами в приёмном тракте) выбирать требуемую рабочую частоту в диапазоне от 1,5 до 5 МГц без смены самой AP, что снижает стоимость оборудования и расширяет возможности при контроле. Одной и той же решёткой можно контролировать и обычную сталь, и аустенитный сварной шов, и пластики.

Конструктивно AP продольных и поперечных волн выполнены однотипно, размещены (вместе с коммутатором) в металлическом корпусе и имеют суммарную апертуру всех элементов 10 x 40 мм. Размеры апертуры выбраны из практических соображений. Увеличение длины AP более 40 мм, с учётом реального качества подготовки поверхности металла к контролю, приводит к ухудшению условий акустического контакта, что снижает эффективность и качество реконструкции в целом. Уменьшение длины ухудшает разрешающую способность и размер зоны контроля. Ширина апертуры 10 мм является типовой для большинства дефектоскопических преобразователей в данном диапазоне частот, что позволяет применять многие отработанные ранее методики.

Количество элементов в этих AP выбрано равным 16 при шаге установки 2,5 мм. Данное решение является оптимальным, как с точки зрения производительности контроля (30 кадров в секунду), так и с точки зрения качества изображения. Для AP продольных волн сектор сканирования составляет приблизительно $\pm 50^\circ$, для AP поперечных волн – от 35° до 75° . Основное назначение этих AP – поиск дефектов в контролируемом объекте. Эти устройства входят в базовый комплект томографа.

Отличительной особенностью AP для поперечных волн является отказ от использования общей призмы. При этом повышение эффективности излучения и приёма поперечной волны достигается за счет специализированной конструкции отдельного элемента, что является запатентованной технологией и не имеет зарубежных или российских аналогов. Это решение позволило создать малогабаритную AP для контроля сварных швов наклонным лучом с малым уровнем реверберационных шумов и широким углом обзора. Внешний вид AP поперечных волн УЗ томографа A1550 IntroVisor™ показан на рис. 7.



Рис. 7. AP поперечных волн УЗ томографа «A1550 IntroVisor™».

Многомодовая AP отличается тем, что она формирует и принимает как колебания продольных, так и поперечных волн, а также и поверхностных волн Релея. Это достигается тем, реальная апертура (параметр «а» на рис.1) одиночного элемента AP не превышает четверти длины поперечной волны для колебаний на рабочей частоте. Шаг установки элементов выбирается из требуемых размеров апертуры и необходимого числа элементов. Для верхней рабочей частоты 5 МГц и с учётом использования поперечных волн, предельное верхнее значение ширины элемента составляет 0,16 мм. При этом надо учитывать, что протектор существенно увеличивает эффективную апертуру элемента за счёт расширения фронта упругих колебаний при их прохождении от пьезоэлемента до поверхности контролируемого объекта. Реализация такой конструкции AP является достаточно сложной задачей, но имеются опытные образцы AP, которые реализуют свойство многомодовости и в дальнейшем планируется их серийный выпуск.

Достоинства многомодовых AP являются возможность электронного управления типом применяемой волны и применения алгоритмов поиска и измерения размеров дефектов с использованием эффектов трансформации типов волн на границе полупространства и краевых эффектов. Направление применения многомодовых методов контроля является одним из перспективных для развития УЗ контроля и томографии.

Обработка и производительность

Как отмечалось выше, работа прибора основана на принципе получения эхосигналов при последовательном переборе всех сочетаний пар элементов AP и обработке этих сигналов по алгоритму SAFT-C. Например, для 16-ти элементной AP общее число реализаций (с учётом совмещённых) составит:

$$K = N \times (N+1) / 2 = 136;$$

При требуемой частоте смены кадров $f_k = 30$ Гц частота зондирования и переключения пар составит:

$$F = f_k \times K = 30 \times 136 = 4080 \text{ Гц};$$

Следовательно, отдельная реализация эхосигнала должна быть получена и обработана за период времени меньший, чем 250 мкс.

Физически сущность обработки по алгоритму SAFT-C идентична для каждого эхосигнала и сводится к полному перебору точек области реконструируемого сечения ($B = X \times Z = 256 \times 256 = 65536$ точек), и последовательному расчету для каждой точки суммарного расстояния до передающего и приёмного элементов: $R = r_1 + r_2$, с учетом координат точки реконструкции, приёмного и передающего элементов. Далее выполняется вычисление времени пробега УЗ импульса, выборка соответствующего мгновенного значения из текущего эхосигнала и накопление результата в ячейке памяти, соответствующей данной точке (рис. 8).

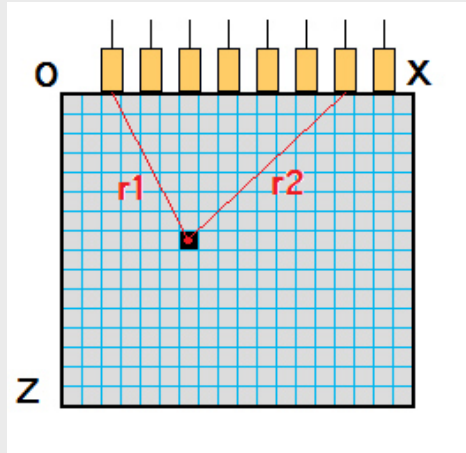


Рис.8. Матрица реконструкции и расчет расстояния для одной точки сечения от одной пары элементов АР.

После перебора всех точек в сечении система переходит к получению следующего сигнала от очередной пары преобразователей и далее весь цикл повторяется до тех пор, пока не будут получены все сочетания. По окончании цикла перебора результат накопления в памяти представляется в цветояростной форме как томограмма.

Очевидно, что темп вычислений с учетом конвейерных методов обработки составит:
 $T = 1 / (F \times B) = 0,00373$ мкс;

Это эквивалентно тактовой частоте процессора порядка 300 МГц. Реализация предложенной концепции возможна только при соответствующем развитии средств вычислительной техники и электронных компонентов, которые стали доступны в последнее время.

Достоинством предложенного решения является гибкость в реализации алгоритмов и адаптация под различные типы АР. Например, для перехода от АР продольных волн к поперечным, достаточно изменить значение скорости УЗ и корректирующую диаграмму направленности. Кроме того, стоимость вычислительных ресурсов постоянно снижается, и данное решение является более дешёвым по сравнению с многоканальным томографом и более перспективным для модернизации и дальнейшего развития.

Параметры прибора

Внешний вид разработанного прибора приведен на рис. 9. Конструктивно он размещен в типовом эргономичном корпусе, разработанном нашей компанией, в котором уже выпускается УЗ дефектоскоп «А1214 Эксперт».



Рис. 9. УЗ томограф «A1550 IntroVisor™».

Большой цветной дисплей обеспечивает индикацию, как графического образа сечения, так и результатов измерения координат и уровней сигналов. Вокруг дисплея расположена пленочная универсальная клавиатура. С тыльной стороны корпуса находится быстросъемный аккумуляторный блок и интерфейсные разъемы.

Конструктивное исполнение обеспечивает защиту от попадания влаги и пыли внутрь корпуса по классу IP65.

Результаты измерений сохраняются в энергонезависимой памяти прибора и могут передаваться на внешний компьютер по кабелю через интерфейс USB.

Основные технические параметры прибора «A1550 IntroVisor™» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Допустимое число элементов AP, шт.	16 ÷ 64
Используемые типы волн	Продольные, поперечные
Скорость реконструкции, кадров в секунду	15 ÷ 35
Размер томограммы в точках	256 × 256
Шаг реконструкции томограммы, мм	от 0,1 до 1
Максимальный размер области реконструкции, мм	±256 по горизонтали × 256 по глубине
Рабочие частоты, МГц	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0
Диапазон перестройки скорости УЗ, м/с	300 ÷ 15000
Тип дисплея	TFT SVGA 640x480
Диапазон рабочих температур	от -10°C до +45°C
Питание	встроенный аккумулятор / сетевое
Время непрерывной автономной работы, ч	не менее 8
Габаритные размеры, мм	258 × 164 × 110
Масса электронного блока, кг	2,7

Основные режимы и функции

В приборе с помощью универсальной клавиатуры и пиктограмм реализован простой, интуитивно понятный интерфейс, позволяющий оператору освоить работу с прибором буквально за десять минут. Управление основными функциями и параметрами выполняется функциональными клавишами, расположенными под экраном, над каждой из которых размещена соответствующая пояснительная пиктограмма. А активные параметры и выбор режима выбираются и перестраиваются расположенными слева от экрана универсальными клавишами.

Прибор имеет три основных режима работы, переключение между которыми производится клавишами «MODE»:

- режим «НАСТРОЙКА» для выбора и установки программируемых параметров и рабочей конфигурации;
- режим «А-СКАН» для работы томографа в качестве типового дефектоскопа с типовыми наклонными и прямыми преобразователями или при эмуляции типового преобразователя с помощью AP;
- режим «В-СКАН» для работы с AP и формирования образов сечений в реальном масштабе времени.

При работе в томографическом режиме «В-СКАН» на экран выводится не только изображение сечения, но и эхосигнал, соответствующий выбранной линии сечения, эквивалентный А-скану классического наклонного или прямого преобразователя, т.е. с помощью AP можно моделировать практически любой преобразователь. Эта функция позволит применять методики для классической эхо дефектоскопии в томографе без использования дополнительных преобразователей.

Для получаемого сечения возможно использование дополнительных способов обработки, устанавливаемых функциональными клавишами и позволяющих улучшить восприятие и качество образов, выполнить измерения. Основные из этих возможностей:

- измерение уровня сигналов и установка координат точки измерения;
- установка масштаба и положения области визуализации относительно AP;
- коррекция отображения кратных эхосигналов с учётом известной толщины;
- формирование масок для выделения рабочей области;
- управление линией сечения;
- оперативное управление яркостью;
- выбор цветояркостной шкалы;
- формирование, сохранение и выбор конфигураций настроек прибора;
- запись томограмм и эхосигналов в память и их оперативный просмотр;
- вывод данных на внешний компьютер.

Набор данных функций прибора позволяет решать задачи оперативного и высокопроизводительного поиска дефектов в сварных швах, в изделиях из металлов и пластиков большого объёма, визуализации их образов и документирования.

После обнаружения дефектов обеспечивается возможность оценки их размеров различными методиками – классическими сравнением с амплитудой образцового отражателя и дефектометрическими путём измерения координат характерных точек образа дефекта непосредственно по реконструируемому изображению. Следует отметить, что при использовании томографа, наряду с повышением производительности контроля, существенно упрощается и становится более доступной интерпретация полученной

информации за счёт её пространственного представления. Это свойство позволит значительно снизить ошибки, обусловленные «человеческим фактором», упростить подготовку специалистов для УЗ контроля без снижения качества самого контроля.

Практические результаты

Первичный опыт применения УЗ томографа «A1550 IntroVisor™» показывает, что ряд задач контроля решаются с его помощью гораздо проще, чем обычными дефектоскопами, а в ряде случаев за счет применения фокусирующей системы и адаптивной перестройки частоты, обеспечивается решение ранее труднореализуемых задач. Ниже приводятся практические примеры и результаты, полученные новым прибором, подтверждающие его универсальность и уникальные свойства.

Сварные швы

Одна из наиболее массовых задач в промышленности – контроль сварных швов. Применение томографа существенно упрощает и ускоряет данную процедуру. Для контроля используется 16-ти элементная широкополосная АР поперечных волн, обеспечивающая обзор в широком секторе, начиная от середины апертуры АР, и до эквивалентных углов ввода порядка 75° - 800 относительно нормали к краю апертуры.

Методика контроля сводится к сканированию АР вдоль сварного шва и наблюдению за экраном прибора. В случае, когда сварной шов не содержит дефектов, на томограмме отсутствуют сигналы в контролируемой области. При появлении дефектов на экране возникают пятна различной яркости и цвета. При этом оператор должен снизить скорость сканирования, добиться образа с наилучшей чёткостью и яркостью и зафиксировать картинку. После этого выполняют измерения координат отражателя и уровня сигнала и делаются выводы о типе дефекта и его размерах в соответствии с используемыми методическими рекомендациями.

На рис. 10 приведены изображения с экрана томографа, полученные при контроле сварного шва для случаев отсутствия и наличия дефектов. Толщина основного металла 20 мм, материал – углеродистая сталь. На этих изображениях области синего цвета символизируют поперечные сечения стального листа толщиной 20 мм. Ось шва расположена на отметке -40 мм по горизонтальной оси на обеих томограммах. Ноль горизонтальной оси этих и всех последующих томограмм соответствует центру апертуры АР.

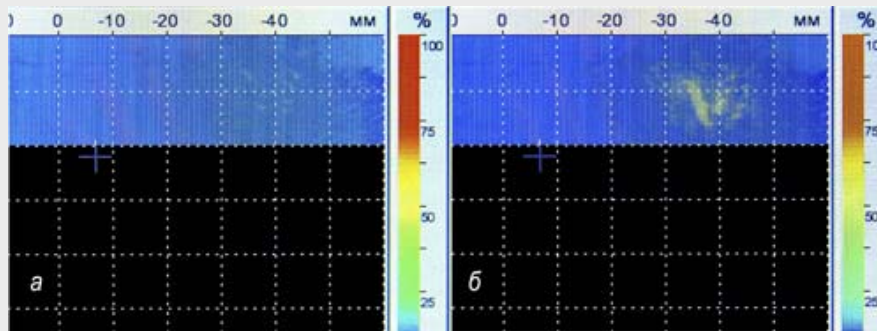


Рис. 10. УЗ томограммы сварного шва листов углеродистой стали толщиной 20 мм: а – область без дефектов; б – область с дефектом типа непровар.

Той же АР поперечных волн был выполнен контроль сварного шва аустенитной стали толщиной 19,6 мм. На границе шва и основного металла выполнены два боковых отверстия диаметром 2,5 мм. Фотография этого шва приведена на рис. 11.

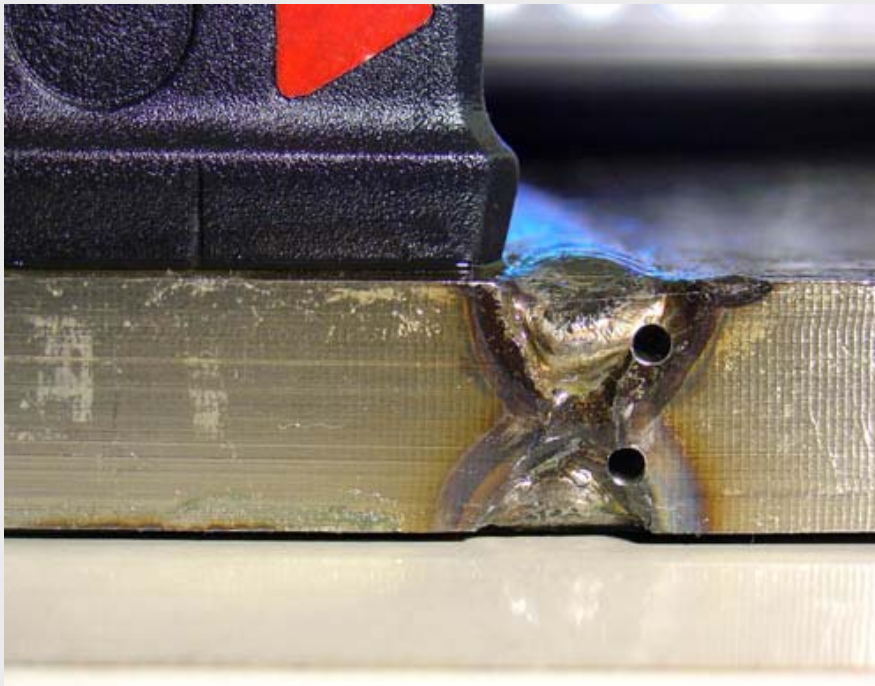


Рис. 11. Сварной шов листов аустенитной стали. Центры отверстий на границе шва находятся на глубинах 5 и 14 мм.

На рис. 12 приведены две томограммы, полученные для расположения АР с двух сторон от аустенитного шва. При контроле шва со стороны отверстий на частоте 4 МГц были получены образы отверстий, координаты которых на экране совпали с реальными

координатами отверстий в металле (см. рис. 12, а). Рядом с образами отверстий достаточно заметно проявилась в виде нерегулярных пятен крупнозернистая структура аустенитного шва и металла околошовной зоны.

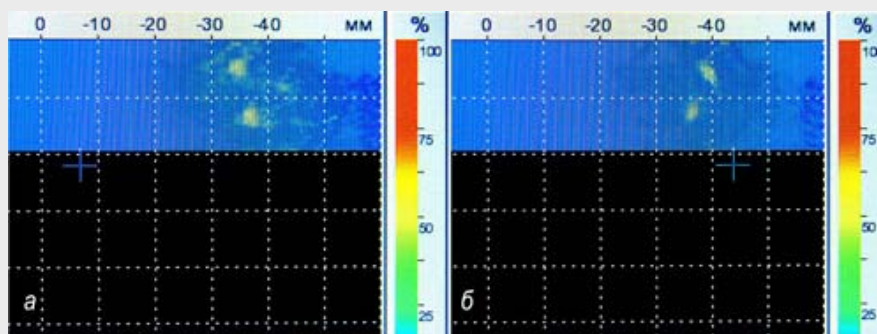


Рис. 12. УЗ томограммы бездефектного сварного шва листов аустенитной стали толщиной 19,6 мм с боковыми отверстиями диаметром 2,5 мм на границе шва: а – АР со стороны отверстий, ось шва на отметке -40 мм по горизонтали; б – отверстия за швом, ось шва на отметке -32 мм.

В случае, когда УЗ колебания проходили через шов, то есть так, как показано на рис. 11, потребовалось снизить рабочую частоту с 4,0 до 2,5 МГц, чтобы получить на экране хорошо различимые образы отверстий. Образы получились менее яркие (см. рис. 12, б), чем в предыдущем случае и их координаты менее точно совпадают с реальными координатами из-за искажающего действия аустенитного шва. В то же время шум структуры шва на томограмме, рис. 12, б, менее заметен, чем на рис. 12, а, вследствие использования более низкой рабочей частоты УЗ волн. Данный пример демонстрирует возможности контроля аустенитных сталей типовой АР, параметры которой можно оперативно перестраивать.

Монолитные конструкции

Для контроля основного металла используется прямая АР, работающая на продольных волнах. При контроле стали, эквивалентный сектор обзора (зона чувствительности) составляет $\pm 50^\circ$ относительно нормали к краям апертуры. Эта АР используется, когда необходимо контролировать массивные заготовки из металлов или монолитных пластиков. Основные достоинства при использовании томографа – высокая производительность и простота оценки местоположения и размеров дефектов. Технология контроля сводится к сканированию АР поверхности объекта и фиксации возникающих на экране образов отражателей.

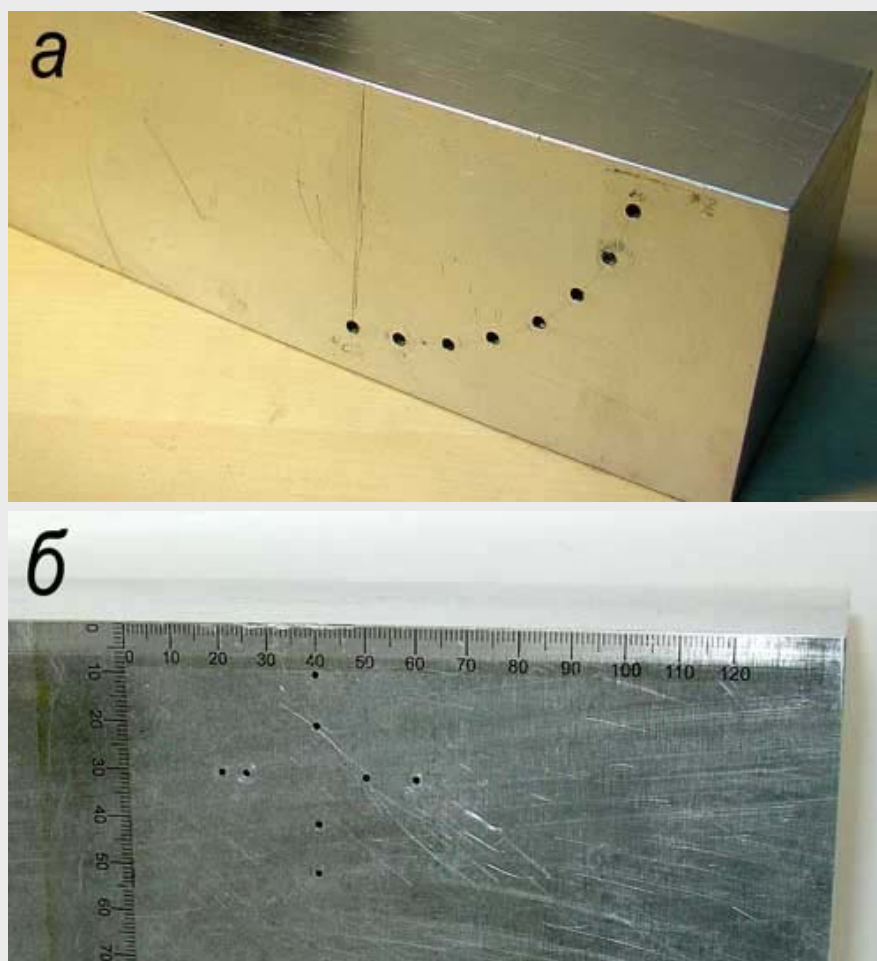


Рис. 13. Алюминиевые образцы: а – с группой боковых отверстий диаметром 2 мм, расположенных по дуге окружности радиуса 41,5 мм; б – с группой отверстий диаметром 1 мм для оценки фронтального и лучевого разрешения и эффекта затенения.

На рис. 13 приведены изображения тестовых алюминиевых образцов, а на рис. 14 и 15 томограммы сечений этих образцов, полученные с помощью АР продольных волн на рабочей частоте 3,0 МГц. Приведённые томограммы демонстрируют высокое качество фокусировки, обеспечиваемое для всех отражателей, лежащих на разных глубинах.

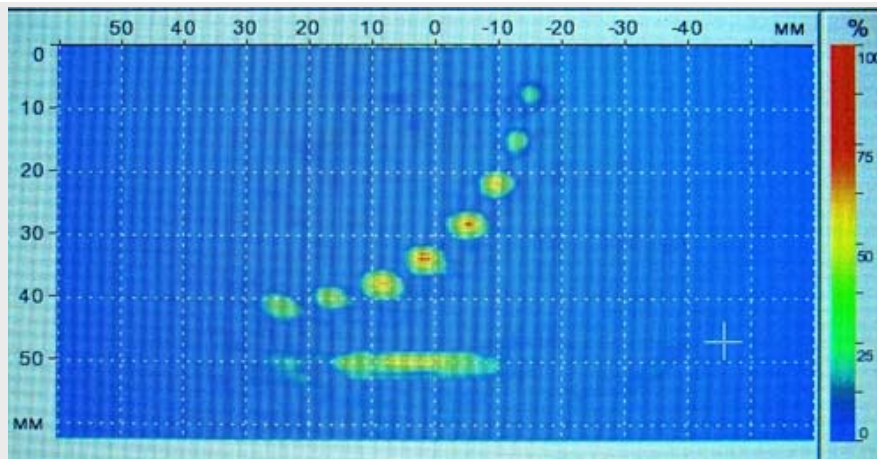


Рис. 14. Томограмма образца из алюминия, показанного на рис. 13, а, полученная с помощью АР продольных волн.

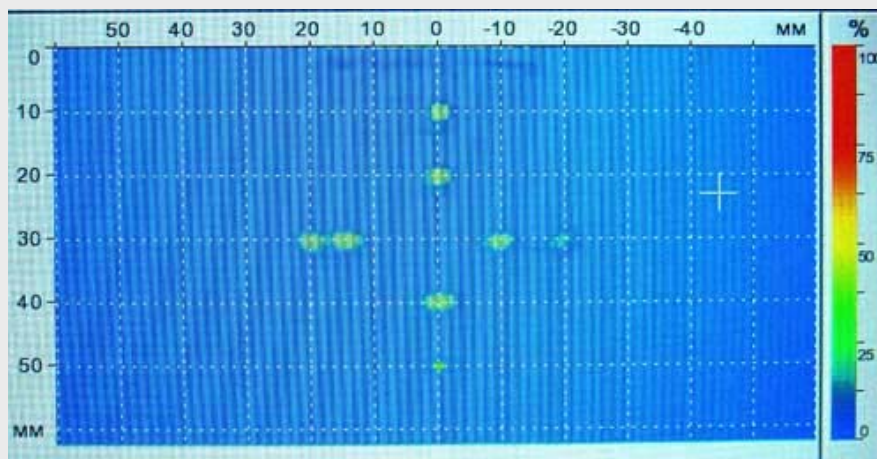


Рис. 15. Томограмма образца из алюминия, показанного на рис. 13, б, полученная с помощью АР продольных волн.

Дополнительно, как достоинство применения АР, следует отметить слабое проявление эффекта затенения одним отверстием другого (см. рис. 15), что достигается за счет многоракурсного прозвучивания при использовании всей апертуры АР. Только для самого нижнего отверстия, лежащего на глубине 50 мм в образце, рис. 13, б, этот эффект уже заметен на томограмме (см. рис. 15). При контроле изделий типовыми прямыми и наклонными преобразователями эффект затенения одним отражателем другого проявляется значительно сильнее.

Та же АР способна работать и на монолитных пластиках. Для этого надо понизить рабочую частоту прибора до 2,0 МГц, установить соответствующую скорость УЗ колебаний и ввести корректирующий затухание коэффициент в меню настроек. Примеры томограмм, полученных на образцах из чёрного полиэтилена П-80, приведены на рис. 16 и 17. Скорость продольных волн в этом полиэтилене 2315 м/с, затухание на частоте 2,5 МГц 0,55 дБ/мм.

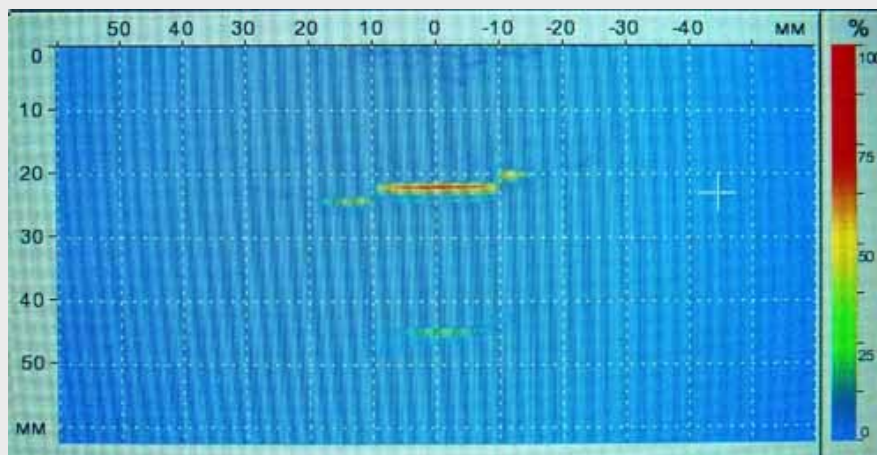


Рис. 16. Томограмма ступенчатого образца из алюминия, полученная с помощью АР продольных волн. Длина ступенек 20 мм, высота 20, 22 и 24 мм.

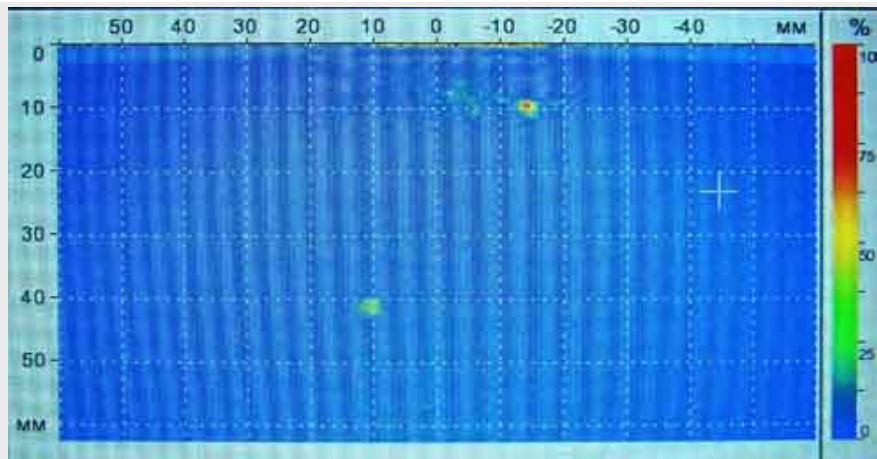


Рис. 17. Томограмма образца из полиэтилена с двумя боковыми отверстиями диаметром 2 мм на глубинах 10 и 40 мм, полученная с помощью АР продольных волн.

На томограмме, рис. 16, хорошо виден образ ступеньки высотой 22 мм в виде горизонтальной красной линии. Справа и слева от этого образа видны образы соседних ступенек, которые частично оказались в пределах сектора обзора АР. Под образом центральной ступеньки на глубине около 45 мм можно различить ещё один образ этой ступеньки, вызванный вторыми отражениями УЗ волн от её поверхности.

На рис. 17 образы обоих боковых отверстий достаточно ясно видны и их координаты на томограмме весьма близки в реальным. Образ отверстия, лежащего на глубине 40 мм, приблизительно на 8 дБ меньше по уровню, чем уровень образа от отверстия на глубине 10 мм.

Заключение

Очевидно, что после определенного этапа привыкания потребителей к новой технике, томография войдет в широкую практику и постепенно вытеснит в массовом контроле простые одноканальные УЗ дефектоскопы, как в своё время цветные телевизоры заменили устаревшие черно-белые.

Но на этом пути необходимо решить ряд актуальных задач, одна из которых – отработка и адаптация методических рекомендаций для ручного УЗ томографического контроля.

На первом, переходном этапе возможно использование типовых методик для УЗ дефектоскопии, но данный подход можно принять как временный. Для специалистов в области УЗ НК в настоящее время открываются широкие перспективы по работам и исследованиям в данном направлении, по созданию новых способов дефектометрии и диагностики.

Другая актуальная задача – отработка технологий производства АР и электронных блоков томографа для снижения их стоимости в массовом производстве и обеспечения необходимой серийности выпуска. В перспективе стоимость томографа при производстве больших партий может приблизиться к стоимости современного дефектоскопа, что обеспечит его широкое внедрение.

Но при использовании любой техники, главным звеном, обеспечивающим основной результат, является человек. И поэтому очень актуальным является разъяснение достоинств новой техники, демонстрация её на практике, обучение персонала работе с прибором.

Мы надеемся, что представленный УЗ томограф «A1550 IntroVisor™» позволит приблизить исполнение мечты классиков нашей науки о звуковидении: «видеть внутри непрозрачных тел» и превратить эту мечту в реальность.

Литература

- Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль // И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. - Quebec: R/D Tech inc., 2004. – 368 p.
- Данилов В.Н., Самокрутов А.А. Моделирование работы пьезопреобразователей с сухим точечным контактом в режиме излучения. //Дефектоскопия, № 8. 2003. С. 11 – 23.
- Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М. Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей. М.: Машиностроение. // Контроль. Диагностика. – 2003. № 7. с. 29 – 33.
- Люткевич А. М., Жуков А. В., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы. // Контроль. Диагностика. – 2004. № 4. С. 3 – 8.
- Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Thickness Measurements and Flaw Detection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method. // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1997, Vol. 13, pp. 73 - 84.
- Люткевич А. М. Выбор параметров системы ручного томографического контроля сварных швов. // Контроль. Диагностика. – 2004. № 5. С. 23 – 30.
- Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая эхо-томография металлоконструкций. Состояние и тенденции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. - № 1. – С. 50 – 59.