
Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке



Пасси Гарри

Генеральный директор и научный руководитель фирмы Sonotron NDT (Израиль).
Д. н., профессор, III уровень НК в пяти дисциплинах (UT, ET, MPI, MIA, RT).

Автоматическое манипулирование лучом в объекте контроля как один из путей решения насущных задач практической ультразвуковой дефектоскопии

Одной из наиболее насущных проблем ультразвуковой дефектоскопии остается невысокий средний уровень подготовки персонала при возрастающих объемах проверок и требованиях к информативности и надежности результатов [1], а потому особое внимание уделяется полной или частичной автоматизации процедур контроля с целью минимизации:

- времени, затрачиваемого на его выполнение;
- стоимости;
- зависимости от субъективизма оператора.

Следует отметить, что, несмотря на значительный рост рынка оборудования, обеспечивающего полную или частичную автоматизацию, сканирование вручную остается наиболее массовым способом выполнения УЗК, что обусловлено разнообразием проверяемых объектов и затрудненным доступом к ним (рис. 1).

Значительным шагом к сокращению объема сканирования вручную является автоматическое манипулирование ультразвуковым лучом (далее для краткости — лучом) в объекте контроля (ОК), сопровождаемое формированием растрового изображения. Один из пионеров этого направления А. К. Гурвич более полувека назад обосновал и практически реализовал прозвучивание сварных швов и других объектов качающимся и бегающим лучом [2–5], а также сформулировал основные положения, учет которых



Рис. 1. Типичные условия выполнения УЗК на объектах нефте- и газодобычи и переработки (а) и соответствующая подготовка операторов в одной из школ НК (б)

при контроле объектов автоматически управляемым лучом безусловно необходим:

- при манипулировании углом ввода луча прозвучивается определенное сечение ОК, размеры и геометрия которого могут и должны быть учтены за счет соответствующего управления задержкой и длительностью зоны контроля в каждом цикле излучения-приема. Это позволяет сформировать *B*-скан изображение, контуры которого полностью повторяют границы прозвучиваемого сечения объекта;
- с целью обеспечения равномерности чувствительности в прозвучиваемом сечении следует компенсировать зависимость коэффициента прозрачности, эффективного размера преобразователя, а также длины пробега ультразвукового импульса в линии задержки (призме) от угла ввода путем поциклового управления усилением дефектоскопа;

- при реализации способов бегающего и качающегося луча необходимо компенсировать дискретность изменения угла ввода и точки выхода луча с целью обеспечения плотности прозвучивания в межлучевых промежутках в объеме объекта, что легко осуществимо с применением методики расчета параметров сканирования традиционными преобразователями, впервые обобщенной и формализованной в [6].

Можно констатировать, что лишь несовершенство элементной базы не позволило внедрить дефектоскопы с автоматическим управлением лучом в практику контроля еще в середине XX в. Интенсивное развитие микроэлектроники и компьютерной техники ближе к концу века создало предпосылки для создания таких дефектоскопов, однако, в это время значительно подешевели энергоресурсы, что привело к сокращению инвестиций в добывающие отрасли, энергетику, тяжелую и военную промышленность и, соответственно, к снижению количества новых разработок в области НК. Высвободившиеся ресурсы инвестировались в другие отрасли, что, в частности, способствовало качественному скачку в медицинском приборостроении, и в числе прочих новинок появились портативные диагностические приборы, обеспечивающие электронное сканирование мягких тканей лучом, формируемым с использованием многоэлементных преобразователей (так называемых фазированных решеток, ФР), и трансформацию совокупности накопленных А-сканов в растровое изображение В-типа.

Лишь в начале XXI в. структурные, функциональные и схемотехнические решения, примененные в медицинских приборах, были заимствованы при создании первых коммерчески доступных портативных дефектоскопов, обеспечивающих электронное сканирование ОК с использованием ФР-преобразователей. При этом в определенной степени была нарушена технологическая преемственность, что усугубилось агрессивной маркетинговой политикой компаний-производителей ФР-дефектоскопов, пропагандирующих абсолютную новизну технических решений и прогнозирующих чуть ли не тотальное замещение традиционных приборов. Поэтому сегодняшний высокий спрос на ФР-дефектоскопы в мире вызван не только положительным эффектом, действительно достижимым при грамотном их использовании, но и недостаточно корректным представлением о них как о некоей панацее, сформированным у значительного числа потребителей в результате агрессивного маркетинга.

Фирма Sonotron NDT при создании своих ручных и автоматических ФР-дефектоскопов руководствуется принципом технологической преемственности, что, по нашему мнению, позволяет обойтись без кардинального пересмотра существующих стандартов на выполнение УЗК, а также довести до реального использования значительное число наработок, реализация которых с использованием традиционной аппаратуры достаточно трудоемка. В данном аспекте рассмотрим ряд практических примеров с использованием портативного дефектоскопа ISONIC 2009 UPA-Score.

Пример 1. Отображение информации при автоматической манипуляции лучом в объекте

Прозвучивание способами бегающего или качающегося луча сопровождается формированием растрового изображения, при котором каждому циклу излучения-приема, реализующему в соответствии с сегодняшней терминологией определенный фокальный закон, соответствует отрезок прямой, отображающий ход луча в ОК. Яркость/цвет отдельных точек этого отрезка модулируется мгновенными значениями амплитуды сигнала на соответствующем А-скане. В ультразвуковой медицинской диагностике А-скан не используется. Это связано с тем, что размеры диагностируемых объектов (внутренние органы, плод, и т. п.) значительно превышают длину волны в мягких тканях, расхождение луча невелико ввиду достаточно сильного затухания и значительной длины ближней зоны, обеспечивающей возможность эффективной фокусировки. Поэтому акустическое изображение практически эквивалентно оптическому (рис. 2).



Рис. 2. В-скан изображение человеческого плода, полученное способом качающегося луча (секторное сканирование)

При ультразвуковой дефектоскопии действуют абсолютно противоположные закономерности — размеры дефектов соизмеримы с длиной волны, небольшое, а во многих случаях — незначительное затухание, малый размер ближней зоны и невозможность эффективной фокусировки при использовании компактных преобразователей, приемлемых для ручного сканирования, обуславли-

вают существенное расхождение луча в объекте и, как следствие, значительное (в разы) превышение проекционных размеров отражателя над его истинными размерами. Следует также не забывать, что при контроле эхо-методом основной измеряемой характеристикой дефекта является амплитуда эхо-сигнала, которая может варьироваться в гораздо более широком динамическом диапазоне по сравнению с медицинской диагностикой. Вследствие этого использование А-сканов для оценки и измерений выявленных дефектов неизбежно и при использовании ФР-преобразователей, а потому вызывает удивление нелогичное расположение А-скана в известных ФР-дефектоскопах, которое отлично от принятого в дефектоскопической практике: ось временной развертки направлена вертикально, а ось амплитуд — горизонтально (рис. 3). Ничем иным, как простым копированием решения, используемого в медицинских приборах лишь при проверке их работоспособности (даже не при практическом использовании), это объяснить невозможно.

В приборе ISONIC 2009 UPA Score все графические изображения безусловно сопровождаются воспроизведением традиционного А-скана, соответствующего точке изображения, отмеченной оператором. При этом возможно управлять стробирующим импульсом и усилением и осу-



Рис. 3. Типичное В-скан изображение, получаемое способом качающегося луча на экране большинства ФР-дефектоскопов (его также называют S-скан)

существлять измерения ультразвуковых сигналов в соответствии с существующими методиками непосредственно во время формирования растрового изображения (рис. 4).

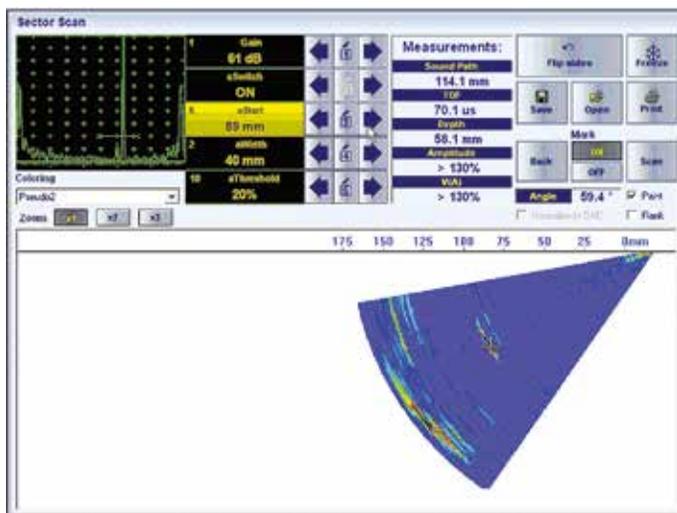


Рис. 4. В приборе ISONIC 2009 UPA-Score S-скан и любое другое графическое изображение сопровождается A-сканом, соответствующим отметке на изображении (+), сделанной оператором; угол ввода для выбранной отметки индицируется как **Angle**

Уникальной особенностью дефектоскопа ISONIC 2009 UPA Score является учет геометрии ОК. Это достигается за счет формирования растрового изображения из накопленного массива A-сканов, каждый из которых может иметь отличную от других длительность, в то время как в медицинских приборах и ФР-дефектоскопах, заимствовавших их архитектуру, такая возможность отсутствует. Простейшим случаем является контроль объектов с эквидистантными поверхностями, например, при прозвучивании сварного шва качающимся лучом, когда часть энергии достигает наплавленного металла, распространяясь непосредственно от поверхности сканирования (прямые лучи), а другая — после отражения от донной поверхности (однократно отраженные лучи), удается четко отличить дефекты типа эрозии, подрезов, и т. п. от сигналов, вызванных отражениями от валика усиления, лишь за счет отображения лучей, формирующих S-скан, с учетом их отражения от стенок объекта: изображения дефектов имеют характерный V-образный профиль, а сигналы,

отражающиеся от валика усиления, формируют дугообразные отметки (рис. 5). Отражатели, воспринимаемые прямым и однократно отраженным лучом, отмечаются на изображении естественным образом в своих

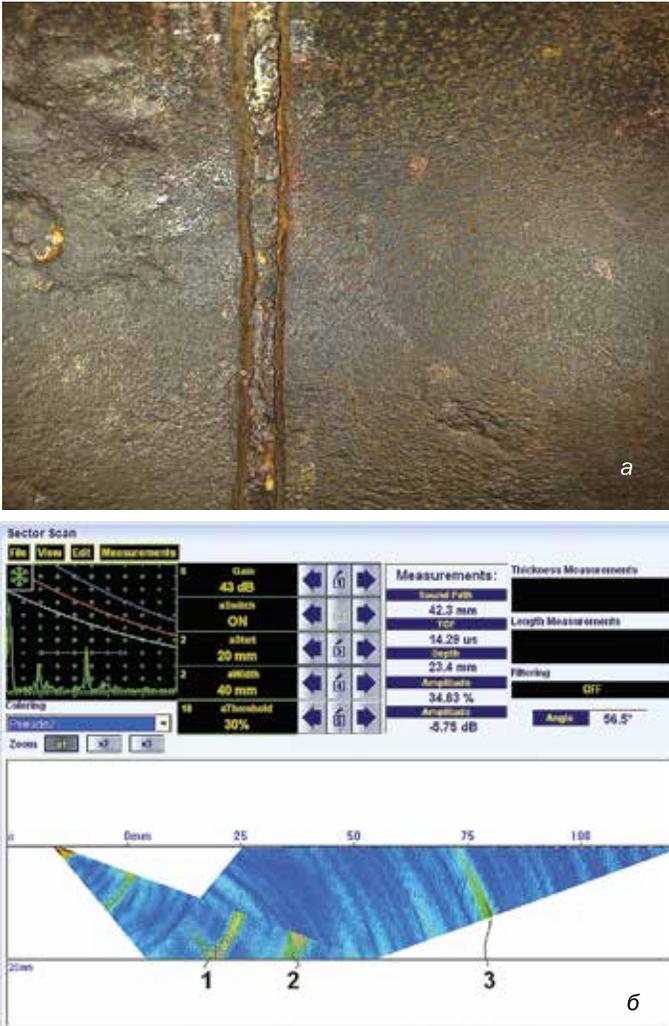
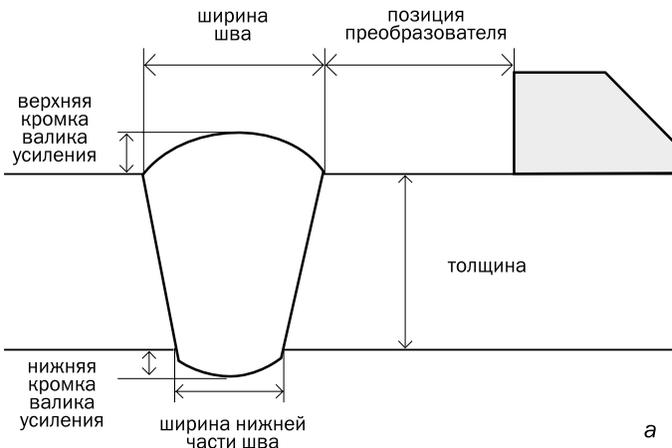


Рис. 5. Эрозия кольцевого сварного шва — снимок со стороны внутренней поверхности трубы (а) и соответствующее V-образное изображение, формируемое прибором ISONIC 2009 UPA-Score (б): 1 — изображение дефекта; 2, 3 — отображение нижнего и верхнего валика усиления соответственно

реальных позициях, в то время как при формировании S-скан изображения в других ФР-дефектоскопах оператору предлагается нечто подобное решению головоломки, когда дефекты, расположенные ближе к поверхности сканирования и выявляемые однократно отраженным лучом, воспроизводятся под донной поверхностью (см. рис. 3).

Еще более соответствующее действительности S-скан изображение при контроле сварных швов формируется после того, как оператор через специальный диалог «образмеривает» поперечное сечение сварного шва, а также задает расстояние от шва до передней грани призмы преобразователя (рис. 6а). В результате автоматически рассчитывается и отображается ход всех лучей в поперечном сечении шва, на основании чего методом простого перебора параметров можно выбрать диапазон углов ввода и позицию преобразователя, при котором поперечное сечение шва прозвучивается полностью (рис. 6б, 6в). Рис. 7 иллюстрирует пример обнаружения ненаправленного дефекта в наплавленном металле — продольного шлакового включения. Такие дефекты выявляются как прямым, так и однократно-отраженным лучом, что обуславливает характерный X-образный профиль в том случае, когда S-скан формируется с учетом геометрии шва. Продольное сканирование ФР-преобразователем позволяет отобразить проконтролированный объем в трехмерном представлении (рис. 8). Важно, что при этом обеспечивается сохранение всех А-сканов, что позволяет в любой момент времени детально проанализировать и обосновать или опровергнуть



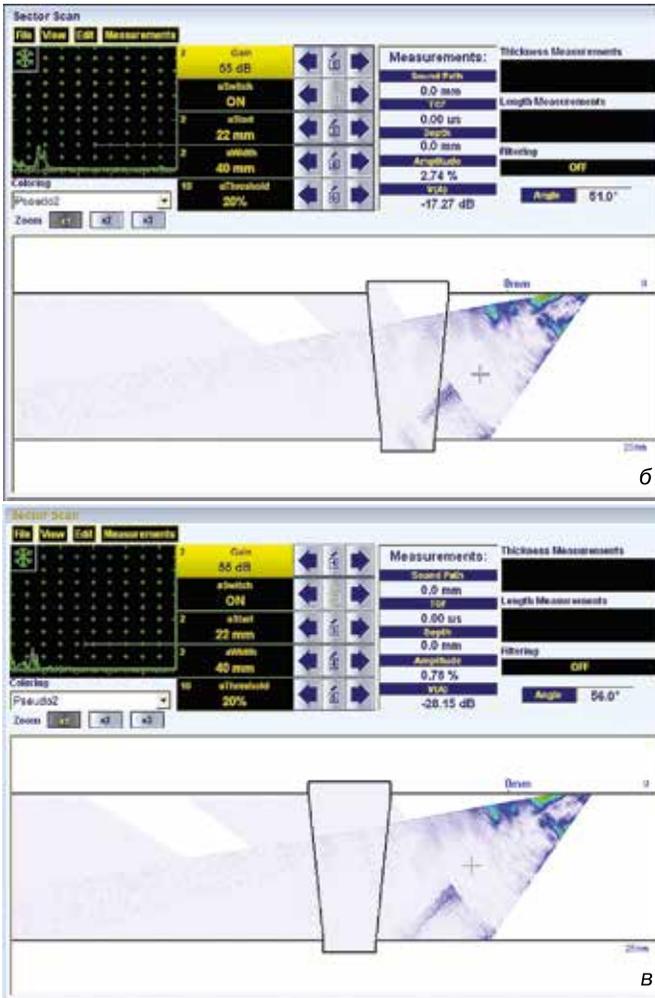


Рис. 6. Учет геометрии сварного шва при формировании S-скан изображения: а — параметры «образмеривания» шва; б — расстояние от передней грани преобразователя до шва выбрано неверно; в – верно

то или иное заключение о дефектности объекта, базируясь на традиционном анализе последовательности эхо-сигналов, принимаемых при озвучивании отражателя. Сохранение данных контроля в виде массива необработанных А-сканов является отличительной чертой всех приборов серии ISONIC [9]

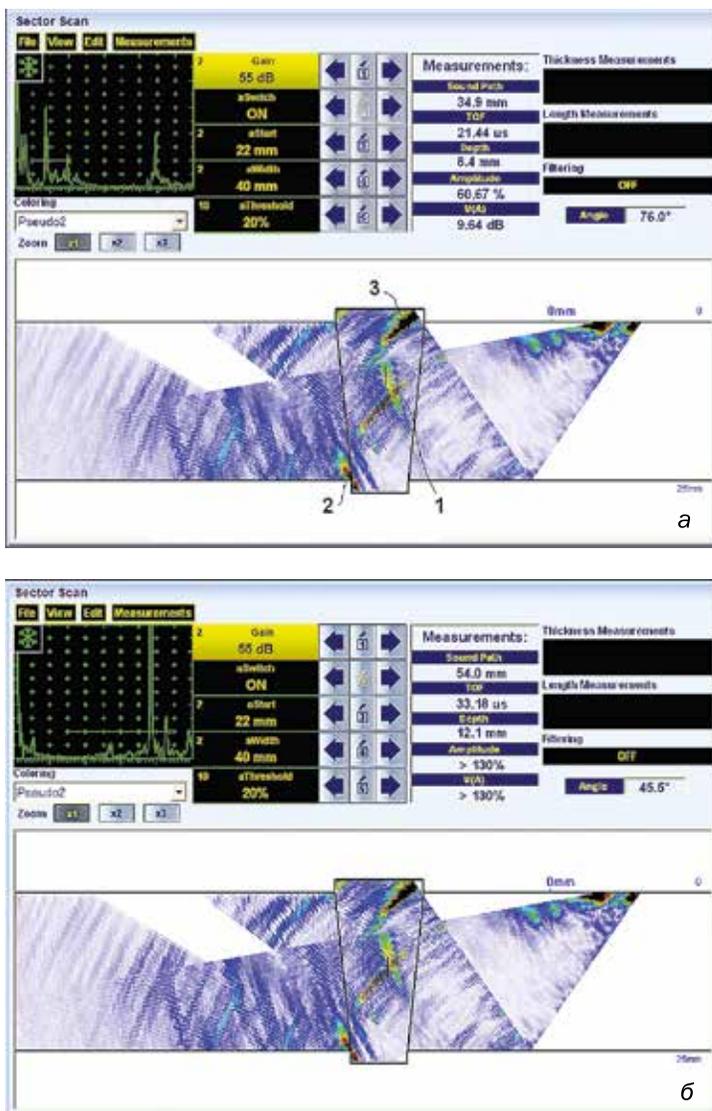


Рис.7. Выявление продольного шлакового включения в наплавленном металле шва: *а* — восстановление одного из А-сканов, соответствующих приему эхо-сигналов прямым лучом; *1* — X-образное изображение, характерное для ненаправленных отражателей на скорректированном S-скане; *2, 3* отметки, соответствующие отражениям от нижнего и верхнего валиков усиления соответственно; *б* — однократно-отраженным лучом

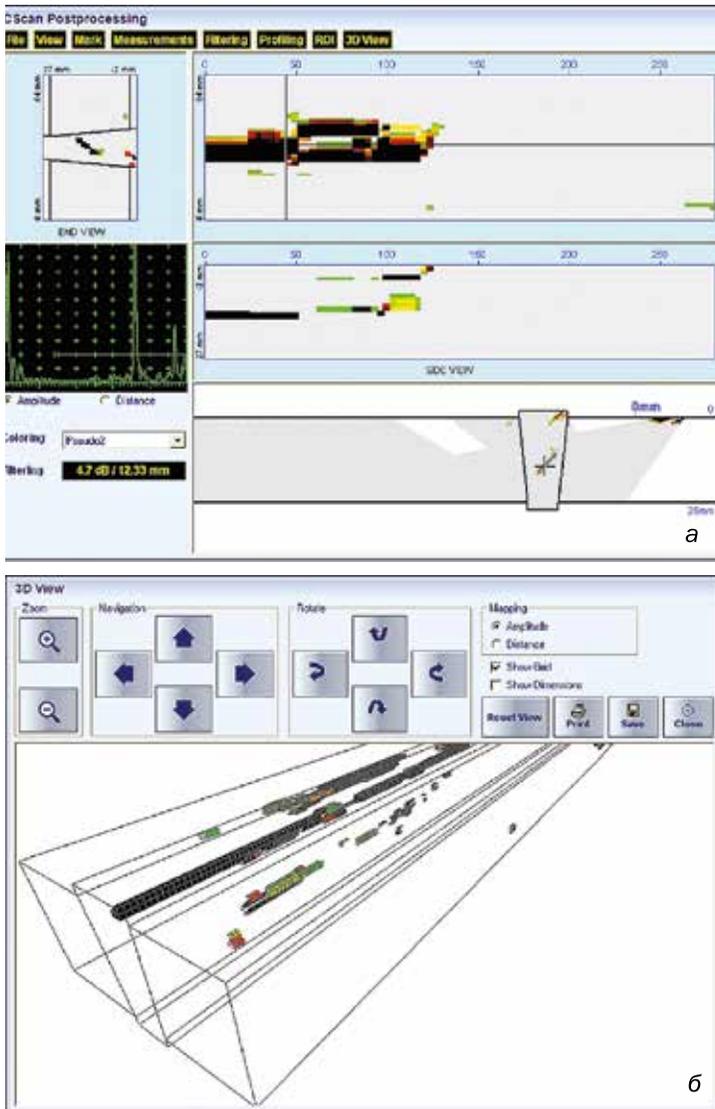


Рис. 8. Трехмерное представление информации в дефектоскопе ISONIC 2009 UPA-Score: а — проекционные изображения (по аналогии с прибором ISONIC 2006 [8]: вид в плане — Top, вид в плоскости продольного сечения — Side, вид сбоку — End); б — аксонометрическое представление

Пример 2. Обеспечение равномерности чувствительности в контролируемом сечении

На рис. 9а представлен образец, который принято использовать для ряда измерений с применением ФР-дефектоскопов. В образце, в числе прочих, выполнены боковые цилиндрические отверстия, центры которых расположены вдоль линии секторов с угловым размером 90° и радиусом 25 и 50 мм соответственно. На рис. 9б показан S-скан, полученный при озвучивании отверстий, расположенных вдоль радиуса 25 мм способом качающегося луча, когда усиление дефектоскопа сохраняется неизменным для всех циклов излучения-приема (фокальных законов), реализованных при формировании растра — таким способом работают все известные ФР-дефектоскопы. Видно, что отражатели, расположенные ближе к поверхности и выявляемые при больших углах ввода,

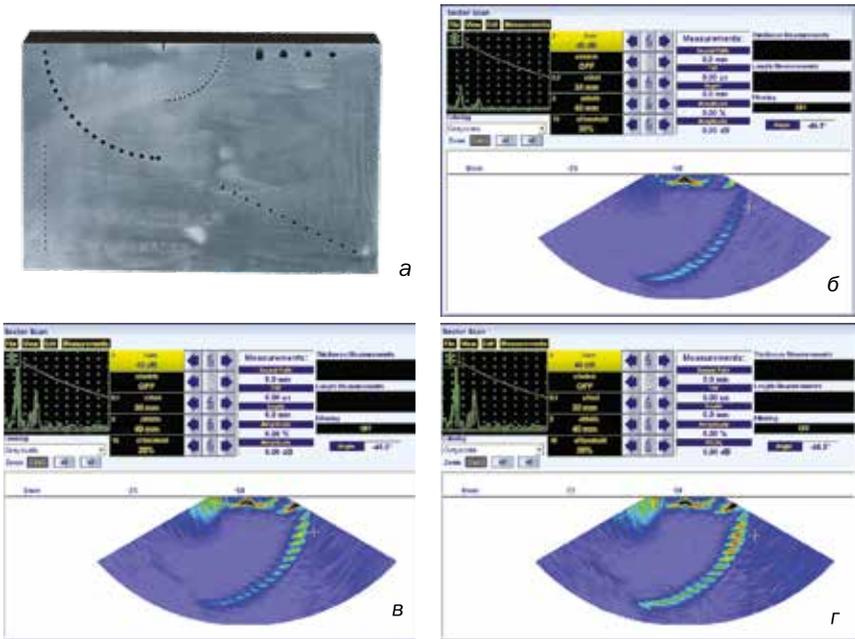


Рис. 9. Тест блок (а) и S-скан изображения, полученные для отверстий, расположенных вдоль линии сектора 90° радиусом 25 мм: б — постоянное усиление во время формирования растра, нормализация по кривой «амплитуда — расстояние» выключена; в — усиление скорректировано в зависимости от реализуемого фокального закона, нормализация по кривой «амплитуда — расстояние» выключена; г — усиление скорректировано в зависимости от реализуемого фокального закона, нормализация по кривой «амплитуда — расстояние» включена

возвращают эхо-сигналы существенно меньшей амплитуды, однако, растровый характер изображения, тем не менее, создает иллюзию полноты прозвучивания. Это еще одна серьезная проблема приборов, созданных путем заимствования технических решений из аппаратуры для медицинской диагностики.

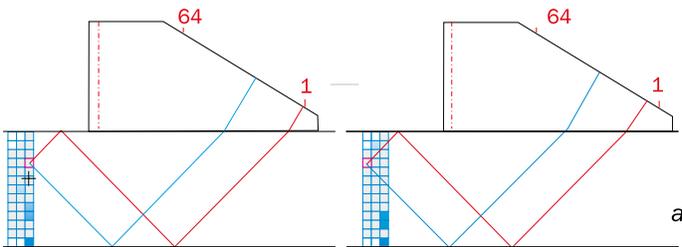
В приборе ISONIC 2009 UPA-Score формирование раstra, при котором усиление в каждом цикле излучения-приема устанавливается индивидуально в соответствии с заданным законом, является стандартным режимом работы. Действие поцикловой коррекции усиления иллюстрируется рис. 9в — изображения отверстий, выявляемых при больших углах ввода, становятся намного четче за счет увеличения амплитуд эхо-сигналов от них. Следует отметить, что с конца 2006 г. данное свойство ФР-дефектоскопов в соответствии с [10] является обязательным, однако, на сегодняшний день в приборах, чья архитектура заимствована из медицинской диагностики, это неосуществимо.

Очевидно, что при реализации способа качающегося луча с использованием ФР-преобразователей, размещенных на линии задержки или призме, время распространения сигнала от пьезоэлементов апертуры до поверхности объекта и обратно так же, как и сопутствующие потери, является переменной величиной. Потери в линии задержки, наряду с другими факторами, компенсируются за счет поциклового управления усилением. Потери в материале ОК, как и в случае контроля обычными преобразователями, могут быть учтены за счет использования кривой «амплитуда-расстояние». Установлено, что при использовании ФР-преобразователей расхождение луча при прочих равных условиях не столь велико, как для обычных преобразователей, что обусловлено электронной фокусировкой, поэтому потери в материале достаточно точно учитываются путем подбора значения коэффициента потерь, дБ/мм. Кривая «амплитуда-расстояние» (DAC) автоматически строится в приборе ISONIC 2009 UPA-Score для каждого фокального закона от поверхности с учетом заданного коэффициента потерь, а цвет/яркость отметок на S-скан изображении формируется путем нормализации мгновенных амплитуд эхо-сигнала относительно соответствующих значений DAC — это позволяет выровнять чувствительность по расстоянию наиболее эффективным образом, сохранив линейность сигналов и не сужая динамический диапазон (рис. 9г). Для этого прибора такой способ выравнивания чувствительности является рекомендуемым, но не единственным.

Так, например, обеспечена возможность построения экспериментальных кривых «амплитуда-расстояние» для каждого фокального закона. Возможно также использование ВРЧ (ТСГ) таким образом, как и в остальных ФР-дефектоскопах, но при этом следует понимать, что динамический диапазон при активной ВРЧ сужается и нарушается линейность.

Пример 3. Выявление неблагоприятно ориентированных дефектов — Тандем В-скан

При прозвучивании способами бегающего и качающегося луча реализуется эхо-метод УЗК, а потому все ограничения, ему присущие, сохраняются и при использовании ФР-дефектоскопов. Это относится, например, к обнаружению вертикально ориентированных плоскостных дефектов — трещин, несплавлений по кромке шва, и т. п., где в соответствии с работами В. Г. Щербинского и Н. П. Алешина [11] альтернативой эхо-методу является тандемная схема с использованием двух преобразователей. Тандемная схема может быть легко реализована с использованием прибора ISONIC 2009 UPA-Score и одного ФР-преобразователя, содержащего достаточное количество элементов (не менее 48), при этом (рис. 10) поперечное сечение ОК в диалоговом режиме разделяется на элементарные объемы, для каждого из которых прибор автоматически определяет схему прозвучивания и апертуры излучения-приема, после чего формируется так называемый «Тандем В-скан» для отдельного поперечного сечения или трех проекционное изображение при продольном сканировании. Равномерность чувствительности в контролируемом сечении обеспечивается за счет индивидуальной настройки усиления для каждого цикла излучения-приема, что легко осуществить путем приема сигналов от вертикальной стенки объекта. Сигналы, соответствующие тому или иному элементарному объему, селективируются узкими строб-импульсами. Цвет/яркость каждого сегмента Тандем В-скан изображения определяется амплитудой максимального сигнала



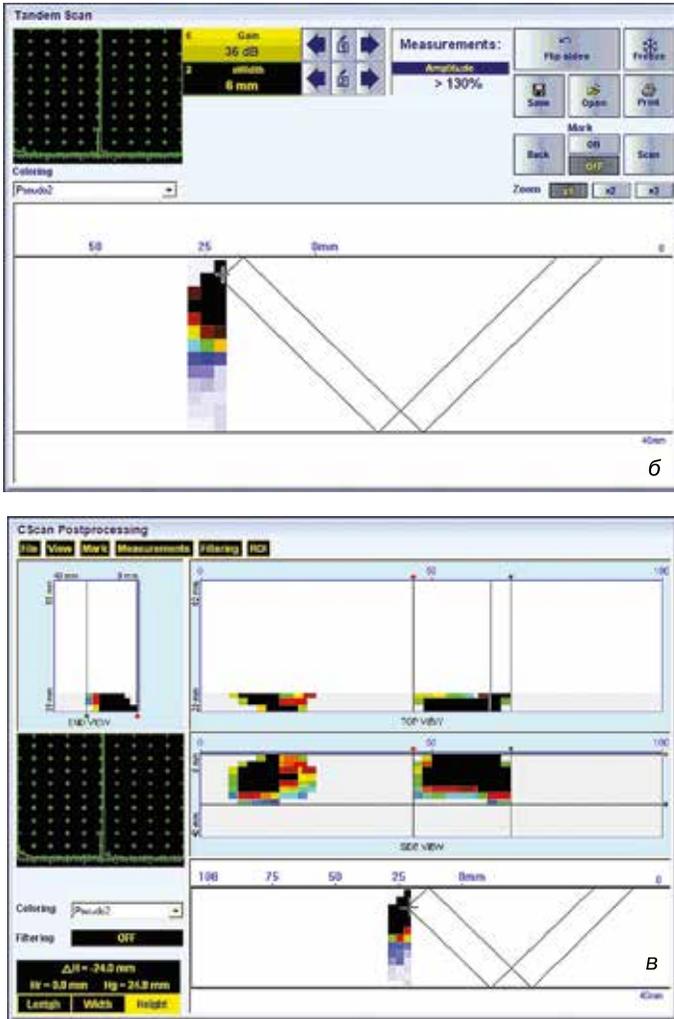


Рис. 10. Реализация схемы Тандем с использованием ФР-преобразователя: *а* — разделение поперечного сечения объекта на элементарные объемы; *б* — прозвучивание поперечного сечения с формированием Тандем *В*-скан изображения; *в* — трехмерное представление информации по результатам линейного сканирования

в соответствующем временном интервале. Таким образом, выполнение контроля по тандемной схеме ускоряется при значительном упрощении процедуры контроля для оператора.

Пример 4. Разделение выявленных дефектов на плоскостные и объемные

Использование ФР-преобразователей позволяет реализовать ряд решений, связанных с актуальной задачей разделения дефектов на объемные (не имеющие острых краев, а потому — менее опасные) и плоскостные. С. Р. Цомуком разработана оригинальная технология, согласно которой дефект озвучивается поперечной волной, после чего анализируются амплитуды двух импульсов, возвратившихся к преобразователю — эхо-сигнала поперечной волны и дифрагированного сигнала продольной волны. При использовании обычных дефектоскопов для приема сигнала продольной волны преобразователь дополнительно оснащается специальным пьезоэлементом, а процедура измерения выполняется в два этапа, что связано с необходимостью изменения усиления и переключения режима излучения-приема при переходе с приема волны одного типа на другой [12]. Несмотря на актуальность проблемы ее решение не внедрилось широко в практику контроля во многом из-за относительной сложности реализации, временных затрат, необходимости применения специального преобразователя. При использовании ФР-дефектоскопа с возможностью управления усилением для каждого цикла излучения-приема и типового ФР-преобразователя реализация данной технологии весьма упрощается, и оператор может получить искомую величину соотношения амплитуд сигналов за одну установку преобразователя. В приборе ISONIC 2009 UPA-Score для этого организуется повторяющаяся последовательность, состоящая из двух циклов излучения-приема. Апертура излучения-приема в обоих циклах одна и та же, но в первом цикле принимаемые сигналы фазируются таким образом, чтобы обеспечить прием эхо-импульса поперечной волны, а во втором — импульса продольной волны; усиление для каждого цикла подбирается таким образом, чтобы анализируемый сигнал находился в пределах 60÷100% высоты А-скана. В результате соотношение амплитуд сигналов разных типов волн непосредственно измеряется и индицируется прибором (рис. 11).

Пример 5. Измерение глубины проникновения трещин

Один из распространенных дефектов эксплуатируемого оборудования — трещина, развивающаяся с поверхности (рис. 12а), а потому определение глубины проникновения трещины, а также остаточной толщины стенки является насущной задачей. При использовании обыч-

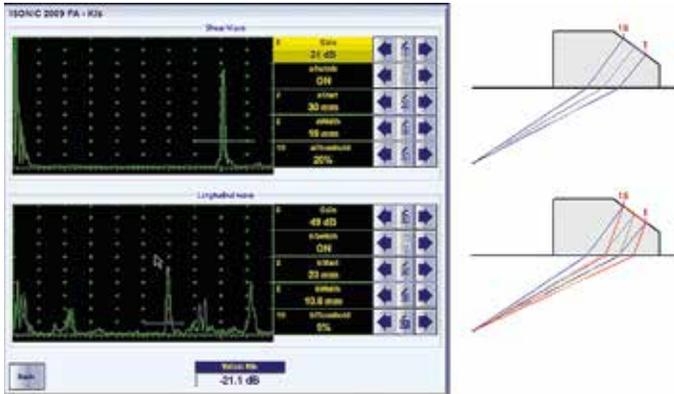
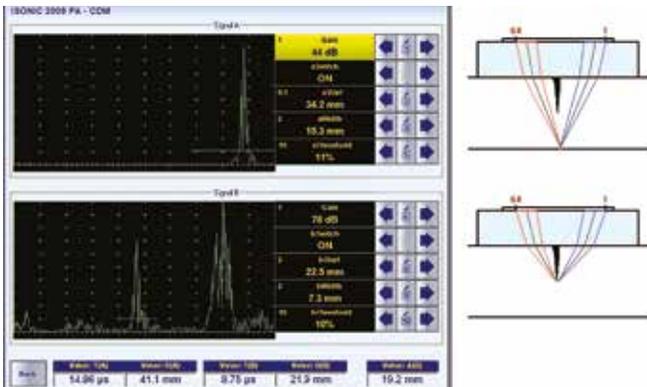


Рис. 11. Прием сигналов поперечной и продольной волны от дефекта, озвучиваемого поперечной волной, и измерение соотношения их амплитуд



б

Рис. 12. Трещина на поверхности сосуда давления (а) и определение глубины ее проникновения и остаточной толщины стенки путем приема донного сигнала и сигнала, дифрагированного на вершине трещины, ФР-преобразователем с разделением излучающей и приемной апертуры (б)

ного дефектоскопа такая задача может быть решена путем приема сигнала, дифрагированного на вершине трещины, с использованием двух преобразователей, расположенных с ее обеих сторон. Эта технология разработана М. В. Григорьевым и А. К. Гурвичем [13], при ее реализации следует найти местоположение пары преобразователей, соответствующие приему дифрагированного сигнала от вершины трещины и донного сигнала, измерить время пробега сигналов и произвести соответствующие вычисления. Очевидно, что практическая реализация данной технологии затруднительна для простого оператора, что часто заставляет прибегать к использованию электро-потенциального метода, весьма неточного, но простого в применении. В дефектоскопе ISONIC 2009 UPA-Score эта технология легко реализуется с использованием ФР-преобразователя с линией задержки, устанавливаемого перпендикулярно трещине. При этом прибор автоматически перестраивает угол ввода и глубину фокальной зоны для разделенных апертур излучения и приема таким образом, что общая фокальная точка «пробегает» от донной до наружной поверхности, и в результате фиксируются два А-скана, с использованием которых искомые величины определяются автоматически (рис. 12 б).

Выводы

1. Новизна технологии ФР заключается в электронном способе управления лучом в объеме ОК. В остальном данная технология должна опираться, в первую очередь, на многочисленные апробированные методические и технологические решения, уже существующие в практике контроля.
2. Архитектура ФР-дефектоскопов должна быть таковой, чтобы иметь возможность учитывать особенности генерации и распространения волн в твердом теле, обеспечивая все необходимые коррекции и компенсации, а также прием и обработку сигналов различных типов волн одновременно.
3. Следует учитывать, что реализация технологии ФР требует наличия в приборе полнофункционального компьютера, а потому неизбежен эффект так называемой «логической отсечки», в определенной степени устанавливающий зависимость воспроизводимых результатов контроля от способа программирования той или иной задачи [14]. В связи с этим безусловно необходимо сохранение всех А-сканов в не-

- обработанном виде с целью обеспечения возможности ретроактивного воспроизведения и анализа последовательностей сигналов без привязки к графическому представлению информации.
4. С другой стороны наличие компьютера внутри ФР-дефектоскопа позволяет эффективно «обучить» его осуществлению уже решенных задач, что может существенно усовершенствовать процедуры практического контроля.
 5. ФР-технология не является панацеей, ей присущ ряд ограничений, таких как, например, существенно больший размер преобразователя, сильная зависимость точности реализации фокальных законов от температуры объекта и т. п. Поэтому ее применение должно быть обосновано экономически и методически.

Литература

1. Rosales J. Consolidation, Lack of Training among Challenges Facing NDT Market. — FROST & SULLIVAN, June 22, 2007. — 2 p. — Доступно в Интернет по ссылке <http://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-top.pag?docid=100574393>.
2. Гурвич А. К. Импульсный ультразвуковой дефектоскоп. Авт. свид. № 106990 (СССР). — Оpubл. 31 мая 1957 г.
3. Гурвич А. К., Кукли А. С. Щуп для ультразвукового дефектоскопа. Авт. свид. № 107280 (СССР). — Оpubл. 8 июня 1957 г.
4. Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений. — Киев: ГИТЛ УССР, 1963. — 228 с.
5. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. — Киев: Техника, 1972. — 460 с.
6. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. — Киев: Техника, 1980. — 101 с.
7. Woo J. A short History of the Development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology. — March, 2006. Доступно в Интернет по ссылке <http://www.ob-ultrasound.net/history1.htm>
8. ISONIC 2006 — Portable Digital Ultrasonic Flaw Detector and Recorder with B-Scan, C-Scan, D-Scan, P-Scan, and TOFD Inspection and Imaging Capabilities/Operating Manual. Rev 1.21. — Sonotron NDT, Dec, 2008. — 480 p. Доступно в Интернет по ссылке <http://www.sonotronndt.com/pdf/om2006.pdf>.
9. Средства акустического контроля: технический справочник. — СПб.: Свен, 2008, с. 56, 57, 117–120.
10. ASME Code Case 2557 — Use of Manual Phased Array S-Scan Ultrasonic Examination Section V per Article 4 Section V. — Approval Date Sep 18, 2006.
11. Щербинский В. Г., Алешин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1976. — 158 с.
12. Цомук С. Р. Экспериментальное исследование отношения амплитуд волн разного типа как идентификационного признака дефекта. — В кн.: Сб. трудов XI Всесоюзной конф. по неразрушающему контролю. Ч. 1. — М.: 1987, с. 134.
13. Алешин Н. П., Белый В. Е., Вопилкин А. Х. и др. Методы акустического контроля металлов/Под ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 459 с.
14. Пасси Г. Степень объективности регистрируемых результатов ультразвукового контроля. — В мире НК. 2005. № 1 (27). С. 46–51.