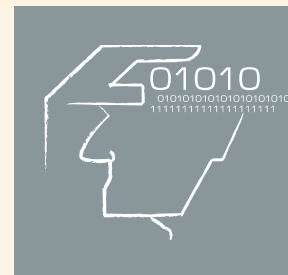


Ultrasonic Phased Array Inspection

1. Emitting and Receiving Ultrasonic Signals Using Phased Arrays

G. Passi

Traditionally ultrasonic phased array (PA) inspection is associated with Sector Scan (S-scan) and B-scan imaging provided through beam steering with use of linear array probes. The only reason for so limited impression is that most of commercially available PA flaw detectors were created through simple copying of medical ultrasound equipment related to diagnostics of human soft tissue. On the other hand the lack of sources providing non-engaged description of principles of operation, strengths and weakness of PA technology independently on type of the instrument and name of the manufacturer leaves practitioners without clear understanding of the specs of the equipment and its real performance. The series of articles started in the present issue of NDT World Review is aimed to resolve the said lack of information submitting UT specialists with a platform for critical comparative analysis of the abilities of PA stuff and technologies.



УЗК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТКАХ.*

1. Излучение и прием ультразвуковых сигналов с применением фазированных решеток

Возможности большинства коммерчески доступных портативных дефектоскопов с преобразователями на фазированных решетках (далее ФР-дефектоскопов) ограничены применением линейных решеток, с использованием которых осуществимо двумерное электронное манипулирование ультразвуковым лучом в материале объекта контроля (ОК) с излучением / приемом волн одного типа. При этом сечение ОК может быть прозвучено путем:

- линейного перемещения луча при постоянном угле ввода (поперечное сканирование);
- углового перемещения луча при манипулировании углом ввода (сканирование качающимся лучом);
- комбинации двух первых.



Пасси Гарри

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

Для прозвучивания заданного объема ФР-преобразователь перемещают по поверхности ОК *продольно* в направлении, перпендикулярном плоскости электронного сканирования, обеспечивая последовательное прозвучивание поперечных сечений вдоль траектории движения. Таким образом, по сравнению с применением обычных преобразователей, когда контроль выполняется путем их *поперечно-продольного* перемещения с относительно малым шагом, использование ФР значительно упрощает процедуру механического сканирования, многократно сокращая длину пути преобразователя по поверхности ОК, что должно обеспечить повышение производительности контроля. Данный эффект, однако, может быть достигнут лишь в случаях, когда процедура (методика, технология) контроля предусматривает обеспечение реальной, а не виртуальной, полноты прозвучивания ОК, а ФР-дефектоскоп при этом способен реализовать необходимый алгоритм работы.

* Автор планирует опубликовать серию статей, посвященных использованию преобразователей на фазированных решетках, в которых рассматриваются способы сканирования, требования к аппаратуре и примеры практического применения. Предлагаемая статья – первая из этой серии.

К сожалению, отсутствие научно-технической литературы, неангажированно освещающей принципы работы, преимущества и недостатки, собственные ФР-технологии безотносительно к типу ФР-дефектоскопов и их производителю, агрессивная маркетинговая политика ряда фирм, выпускающих аппаратуру, предопределили недостаток знаний, как у специалистов организаций, торгующих оборудованием, так и у потребителей, что способствовало возникновению ряда заблуждений (мифов) к которым, например, относятся следующие положения:

- полнота прозвучивания поперечного сечения ОК обеспечивается лишь за счет «качания» луча в нужных пределах;
- скорость линейного перемещения ФР-преобразователя при сканировании ОК такая же, как скорость перемещения обычного преобразователя при осуществлении поперечно-продольного сканирования;
- первичной информацией при контроле с использованием ФР-преобразователей является изображение поперечного сечения ОК;
- излучение/прием продольных волн в материале ОК невозможны при использовании ФР-преобразователей и наклонных призм с закритическим углом;
- и т. п.

Для приведения полного списка подобных мифов, составленного автором с коллегами в результате опроса сотен специалистов в более чем 60 странах, и их аргументированного опровержения, может потребоваться не один месяц и не один выпуск журнала, а потому данный подход, по нашему мнению, не рационален. В настоящей статье предпринята попытка систематизировать информацию об ультразвуковой дефектоскопии с использованием ФР и сформулировать общие требования к аппаратуре и схемам прозвучивания, исходя из безусловного приоритета полноты сканирования, без обеспечения которой невозможно говорить о надежности и производительности контроля разнообразных материалов и изделий.

Электронное управление лучом

Рассмотрим линейную ФР, состоящую из N элементов (рис. 1). Для определенности предположим, что решетка установлена на наклонную призму с за критическим углом β , и допустим, что M_E элементов ($M_E \leq N$) используются для излучения колебаний, формируя так называемую *апертуру излучения*. С учетом пренебрежимо малого расстояния между соседними элементами излучающей апертуры можно считать, что размер линейной апертуры излучения в плоскости падения луча равен $M_E P$, где P – шаг решетки (*pitch size*), а ее площадь $S = M_E E$, где E – ширина элементов (*elevation*). Согласно блок-схеме ФР-дефектоскопа (рис. 2) каждый из элементов подключен к собственному генератору зондирующих импульсов. Синфазное возбуждение всех элементов апертуры излучения обеспечивает формирование акустического зондирующего импульса, эквивалентно тому, что был бы сгенерирован обычным монолитным прямоугольным пьезоэлементом размерами $M_E P \times E$, а угол α ввода поперечной волны в материале ОК также, как и в случае использования монолитного пьезоэлемента, определяется соотношением Снеллиуса:

$$\alpha = \arcsin[(V_{s2}/V_{l1})\sin\beta], \quad (1)$$

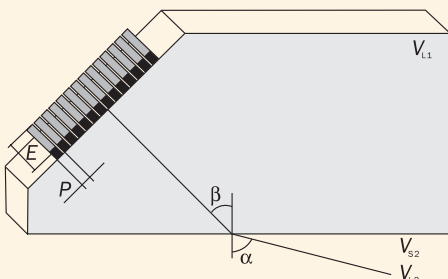


Рис. 1. Линейная ФР на призме с за критическим углом

где V_{l1} – скорость продольной волны в призме; V_{s2} – скорость поперечной волны в материале ОК.

Электронное управление углом ввода возможно за счет возбуждения элементов апертуры излучения зондирующими импульсами, задержанными друг относительно друга по определенному закону (*фазировки*). Рассмотрим для определенности простейший случай возбуждения поперечной волны с углом ввода α_1 без электронной фокусировки (плоский фронт в ближней зоне, рис. 3а,б).

Режим 1: $\alpha_1 > \alpha$

Зондирующий импульс сначала подается на первый элемент апертуры с номером M_{E1} (нулевая задержка), а задержки τ_i для элемента с номером i , где i меняет значение в пределах от M_{E1} до $M_{E1} + M_E - 1$, определяются следующим образом:

$$\tau_i = P \sin(\beta_1 - \beta)(i - M_{E1})/V_{l1}. \quad (2a)$$

Режим 2: $\alpha_1 < \alpha$

Зондирующий импульс сначала подается на последний элемент апертуры с номером $M_{E1} + M_E - 1$, а задержки τ_i для элемента с номером i , где i меняет значение в пределах от $M_{E1} + M_E - 1$ до M_{E1} определяются следующим образом:

$$\tau_i = P \sin(\beta_1 - \beta)(M_{E1} + M_E - 1 - i)/V_{l1}. \quad (2б)$$

Здесь

$$\beta_1 = \arcsin[(V_{l1}/V_{s2})\sin\alpha_1]. \quad (3)$$

При этом эквивалентная излучающая поверхность сохраняет плоскую форму, а ее эффективная площадь S_{EF} равна:

$$S_{EF} = EP M_E \cos(\beta_1 - \beta). \quad (4)$$

На основании рассмотренного простейшего примера можно заключить, что **электронное манипулирование углом ввода для заданной апертуры излучения сопровождается изменением:**

- **эффективной площади излучения;**
- **длины центрального луча в призме.**

Очевидно также, что при за критическом угле призмы возможно формирование не только поперечной, но и продольной волны под заданным углом в материале ОК, при этом угол падения β_{ll1} , формируемый электронным способом, определяется в соответствии с (3), где вместо скорости V_{s2} поперечной волны в материале ОК используется значение скорости продольной волны V_{l2} :

$$\beta_{ll1} = \arcsin[(V_{l1}/V_{s2})\sin\alpha_1]. \quad (5)$$

Важно лишь, чтобы диапазон манипулирования задержками зондирующих импульсов относительно друг друга (*диапазон фазировки*) перекрывал все возможные значения формируемых временных сдвигов.

Не углубляясь в математические выкладки, заметим, что при излучении сфокусированного луча под заданным углом фазировка осуществляется по более сложным соотношениям, получаемым исходя из необходимости синфазного сложения волн, сформированных каждым из элементов апертуры излучения в определенной фокальной точке. При этом формируется вогнутая эквивалентная излучающая поверхность (рис. 3в). Для ряда задач контроля наоборот применяется расфокусированное излучение с формированием выпуклой эквивалентной излучающей поверхности.

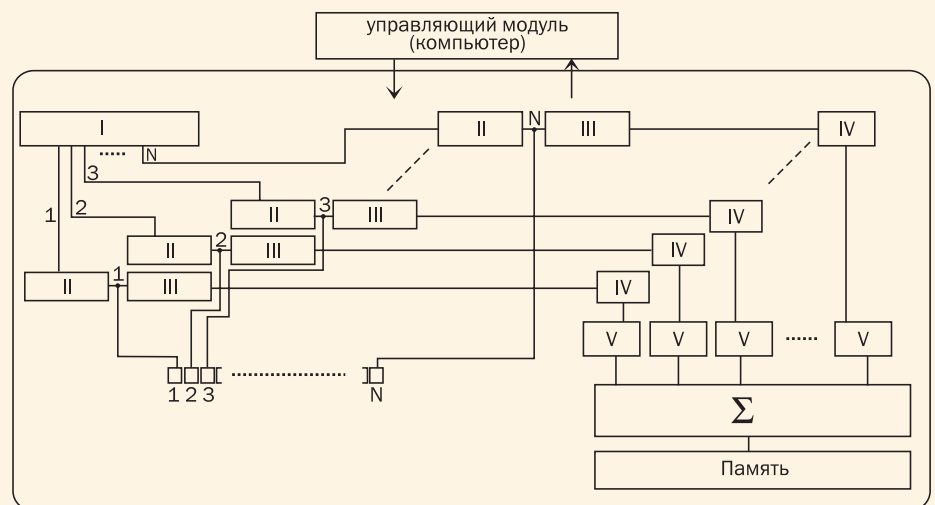


Рис. 2. блок-схема ФР-дефектоскопа:

I – синхронизатор; II – генератор зондирующих импульсов канала; III – приемный тракт канала; 1, 2, 3, ... N – номера каналов и элементов ФР; IV – АЦП канала; V – сдвиговой регистр канала; Σ – сумматор; память – быстрая буферная память (т. н. focal laws memory – память фокальных законов)

Прием сигналов ФР-преобразователем

Благодаря малому шагу линейной ФР (рис. 1) каждый из ее элементов является ненаправленным приемником. Для приема того или иного сигнала формируется так называемая *приемная апертура*, которая характеризуется следующими параметрами:

- M_R – количество элементов, которое не обязательно должно быть равно M_E или N ; следует также отметить, что в зависимости от ожидаемых сигналов приемная апертура может полностью или частично совпадать с излучающей или не совпадать вообще;
- номера элементов, формирующих приемную апертуру (при $M_R < N$), т. е. их расположение внутри ФР; для линейной ФР достаточно задать номер стартового элемента;
- направление, с которого принимается сигнал (угол α_R);
- координаты фокальной точки;
- тип принимаемой волны (задается путем ввода скорости волны в материале ОК, например V_{s2} или V_{l2}).

Приемный тракт (рис. 2) обеспечивает усиление сигналов для каждого из элементов до уровня, достаточного для их оцифровки, после которой каждый из элементарных А-сканов представляет собой одномерный вектор (массив) A_j мгновенных значений амплитуды невыпрямленного сигнала, определенных с выбранной частотой квантования в течение заданного интервала времени: $A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{jQ}$. Здесь j – номер элемента ФР, а Q – количество значений мгновенной амплитуды сигнала, формирующих вектор,

$$Q = \text{TimeBase} \cdot F_{\text{ADC}}, \quad (6)$$

где TimeBase – длительность интервала, а F_{ADC} – частота квантования.

Для выделения сигнала волны заданного типа, принимаемого с определенного направления с обеспечением желаемых координат фокальной точки, полученные числовые массивы складываются со сдвигом, причем временные задержки определяются по соотношениям, аналогичным приведенным выше для режима излучения, а шаги сдвига – путем умножения полученных значений задержек на частоту квантования. Вычисленные таким образом шаги сдвига реализуются сдвиговыми регистрами, и сфазированные должным образом элементарные А-сканы суммируются; в результате в память загружается результирующий массив – *суперпозиционный А-скан*.

Таким образом, формирование суперпозиционного А-скана путем суммирова-

ния со сдвигом сигналов, воспринимаемых всеми элементами апертуры приема, повторяет физический процесс приема сигнала виртуальным монолитным пьезоэлементом, чей наклон, форма принимающей поверхности и эффективная площадь приема определяются перечисленными выше параметрами.

На основании рассмотренного простейшего примера можно заключить, что **электронное манипулирование углом ввода для заданной приемной апертуры сопровождается изменением:**

- **эффективной площади приема;**
- **длины центрального луча в призме.**

Первичная информация при УЗК с применением ФР и канальность ФР-дефектоскопов

Элементарные А-сканы, формируемые каждым из элементов приемной апертуры, представляют собой первичную физическую информацию, однако их анализ и оценка вне взаимной свя-

зи не имеют практического смысла. Поэтому первичной информацией при контроле с использованием ФР считается *суперпозиционный А-скан*, аналогичный формируемому обычным преобразователем с монолитным пьезоэлементом в течение одного цикла излучения-приема, а естественным требованием к ФР-дефектоскопу будет формирование одного суперпозиционного А-скана за один цикл излучения-приема, для чего электроника дефектоскопа должна быть оснащена достаточным количеством АЦП и сдвиговых регистров, обеспечивающая фазировку и суммирование элементарных А-сканов в реальном времени в режиме «on the fly» («на лету»).

Первичной информацией при контроле с использованием ФР является суперпозиционный А-скан, аналогичный формируемому обычным преобразователем с монолитным пьезоэлементом в течение одного цикла излучения-приема.

Показатели канальности ФР-дефектоскопов

Показатель	Обозначение	Пояснения
Количество каналов	N	Максимальный размер ФР, с которой способен работать прибор
Количество генераторов зондирующих импульсов	M	Предопределяет максимальный размер апертуры излучения. В малоканальных приборах (16), как правило, $M = N$ (например, $M:N = 16:16$). В приборах с большим количеством каналов $M \leq N$, например $M:N = 16:64$ или $32:128$, или $64:64$. При $M < N$ применяется мультиплексирование выходов генераторов на элементы ФР, что ограничивает гибкость прибора при реализации различных режимов работы. Применение матричных ФР эффективно при $M = N \geq 64$.
Количество АЦП / сдвиговых регистров	$N_{\text{ADC}} / N_{\text{FIFO}}$	Данный показатель, как правило, не приводится рядом производителей ввиду того, что в большинстве приборов выходы приемного тракта мультиплексируются на входы АЦП. При мультиплексировании получение одного суперпозиционного А-скана в течение одного цикла излучения-приема колебаний осуществимо лишь для малой апертуры приема. Формирование сигнала для большей приемной апертуры возможно путем накопления в течение нескольких (≥ 2) циклов излучения-приема, что заставляет в разы снижать скорость сканирования в направлении, перпендикулярном плоскости падения луча, существенно ограничивая производительность контроля. Например, в некоторых ФР-дефектоскопах, конфигурация которых, согласно спецификации $M:N = 16:64$, имеется всего 4 АЦП, а потому формирование суперпозиционного А-скана при приемной апертуре, состоящей из 16 элементов, занимает по меньшей мере 4 цикла излучения-приема.

Практический пример, подтверждающий важность наличия в ФР-дефектоскопе возможности излучения-приема с использованием как можно большей апертуры, иллюстрируется на примере контроля толстостенных алюминиевых швов специального назначения толщиной 200 мм. Фотография настроенного образца с боковыми сверлениями диаметром 3 мм и тонким пропилом глу-

биной 2 мм на донной поверхности показана на рис. 4а. Рис. 4б, в отображают результаты прозвучивания образца поперечной волной на частоте 5 МГц способом качающегося луча (секторное сканирование) для совмещенной апертуры излучения-приема, состоящей из 16, 32 и 64 элементов соответственно. Во всех трех случаях применялась одна и та же 64-элементная линейная

ФР, установленная на 36°-ной призме. Преимущество использования режима 64:64 по отношению сигнал/шум и разрешающей способности очевидно, что достигается за счет максимальных эффективной площади излучения-приема и дальности фокусировки. Аналогичные преимущества режима 64:64 проявляются при контроле обычных швов, сварных стыков рельсов, и т. д.

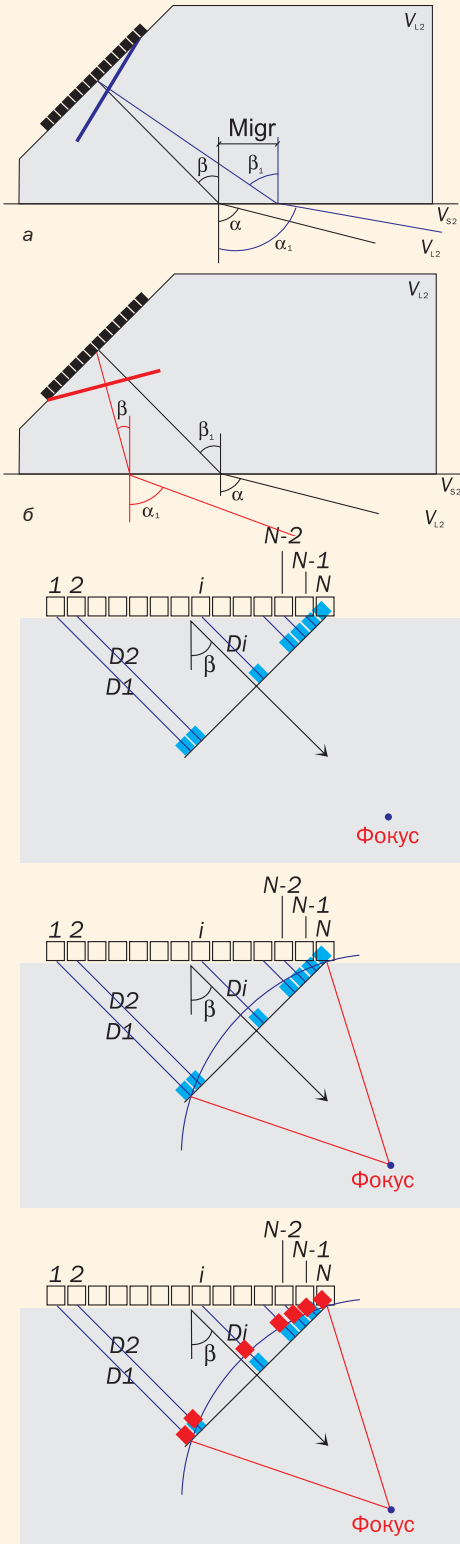


Рис. 3. Эффективная излучающая поверхность при электронном манипулировании ультразвуковым лучом (Migr – миграция точки выхода луча)

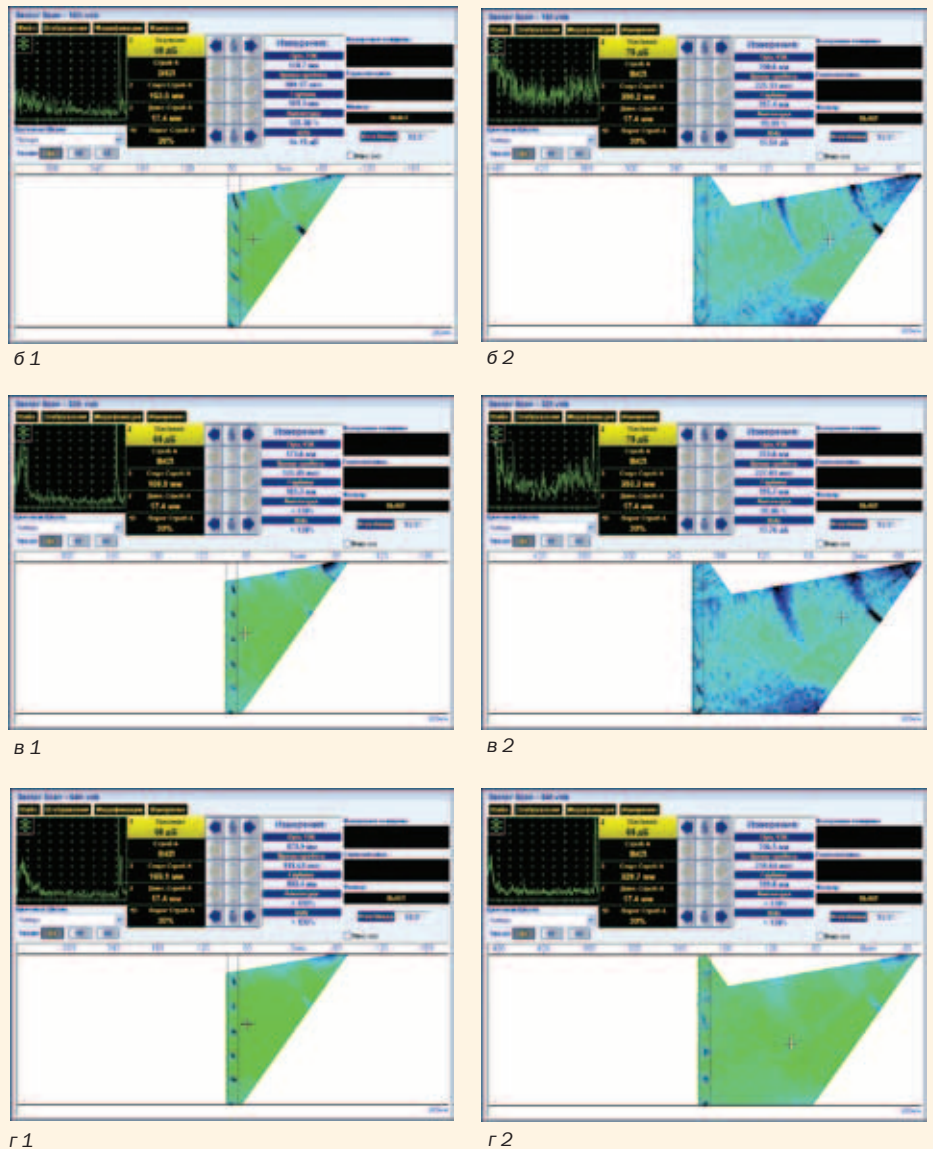


Рис. 4. Настроечный образец для контроля алюминиевых швов толщиной 200 мм в изделии специального назначения (а) и результаты сканирования способом качающегося луча для совмещенной апертуры излучения-приема 16:16 (б1 – прозвучивание прямым, б2 – прямым и однократно отраженным лучом), 32:32 (в1 – прямым, в2 – прямым и однократно отраженным лучом) и 64:64 (г1 – прямым, г2 – прямым и однократно отраженным лучом); частота – 5 МГц, шаг решетки – 1 мм, ширина элементов – 10 мм, угол призмы – 36°. Способ изображения – TTGI (true-to-geometry imaging). Фокусировка – вдоль вертикальной линии по центральной оси шва

Реализация последовательности фокальных законов

Под фокальным законом понимают один цикл работы ФР-дефектоскопа для заданных апертуры излучения и приема с выше определенными параметрами, помимо которых каждый цикл характеризуется типичными для любого ультразвукового прибора (как ФР, так и обычного) настройками тракта излучения-приема, среди которых мощность, амплитуда и длительность зондирующего импульса, усиление и полоса частот приемника, задержка и длительность «развертки» (TimeBase) и т. п. Реализация каждого фокального закона завершается формированием и запоминанием суперпозиционного А-скана в быстрой буферной памяти (рис. 2). Прозвучивание поперечного сечения ОК осуществляется путем реализации последовательности фокальных законов, в результате чего в буферной памяти накапливается набор суперпозиционных А-сканов, из которых формируется кадр изображения, соответствующий способу прозвучивания. В общем случае при реализации фокальных законов каждому из них могут быть присущи разные, не зависящие друг от друга, настройки тракта, а электроника ФР-дефектоскопа должна обеспечивать автоматическое переключение этих настроек с частотой посылок, то есть при переходе от одного цикла излучения-приема к другому. Комбинация настроек тракта излучения-приема, необходимая для формирования кадра, также хранится в памяти фокальных законов в процессе формирования кадров поперечного прозвучивания.

Следует отметить, что такой параметр, как объем памяти фокальных законов, приводимый в спецификации любого ФР-дефектоскопа, не полностью характеризует возможности прибора, так как не менее важным является режим реализации памяти фокальных законов, однако, многие фирмы-производители вообще не приводят эту информацию в своих рекламных и технических документах. Единственной причиной этому,

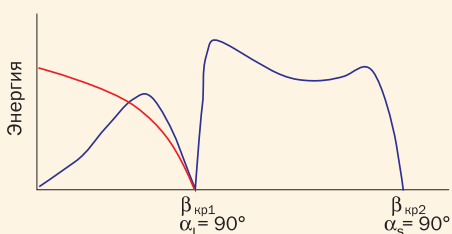


Рис. 5. Характер зависимости коэффициента прозрачности по энергии от угла ввода: красный и синий цвет — продольная и поперечная волны соответственно; $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$ — первый и второй критические углы соответственно

по-видимому, является то, что архитектура большинства современных коммерчески доступных ФР-дефектоскопов заимствована из медицинских ультразвуковых приборов для диагностики мягких тканей, а потому в этих дефектоскопах каждый цикл излучения-приема реализуется практически с идентичными настройками тракта (за исключением задержки «развертки»), что неверно с методической точки зрения. Например, как следует из приведенного выше рассмотрения режимов излучения и приема колебаний с использованием ФР, при контроле способом качающегося луча (секторное сканирование) каждому фокальному закону соответствуют индивидуальные, отличные от других эффективная площадь излучения-приема и ход центрального луча по призме, а, следовательно, и потери в призме (рис. 3а, б). В дополнение к сказанному коэффициент прозрачности по энергии существенно зависит от угла ввода (рис. 5). Названные факторы обуславливают необходимость индивидуальной подстройки усиления для каждого фокального закона. Аналогичная подстройка требуется и при контроле способом бегающего луча (линейное сканирование), когда сканирование осуществляется путем перемещения апертуры излучения-приема вдоль линейной ФР — в данном случае эффективная площадь излучения-приема остается неизменной, а факторами, определяющими необходимость индивидуальной подстройки усиления для каждого фокального закона, являются изменение потерь в призме вследствие разного хода центрального луча (рис. 6) и неидентичность (в пределах допуска) элементов ФР, формирующих апертуру в каждом цикле излучения-приема. Процедура настройки коррекции усиления достаточно проста — в тех приборах, где это возможно, предусмотрен соответствующий диалог, позволяющий пошагово выполнить набор всех фокальных законов, подлежащих реализации, получив для каждого из них сигнал от эталонного отражателя, и привести амплитуды всех сигналов к одному и тому же уровню (рис. 7). Для прозвучивания

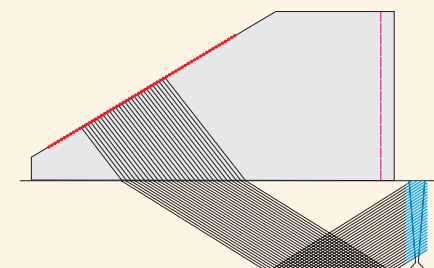


Рис. 6. Линейное электронное сканирование — способ бегающего луча: каждый фокальный закон реализуется со смещением апертуры на один элемент и сопровождается изменением хода луча по призме

способом качающегося луча (секторное сканирование) в качестве эталонного отражателя используется вогнутая цилиндрическая поверхность; способом бегающего луча — боковое цилиндрическое сверление. При этом эталонный отражатель должен находиться за пределами ближней зоны, а для каждого нового фокального закона следует максимизировать амплитуду эхо-сигнала, чтобы компенсировать смещение точки выхода луча. Согласно существующим нормам кривая корректировки усиления должна быть задокументирована для каждого преобразователя и соответствующей процедуры контроля. Изготовители приборов, где режим индивидуальной подстройки усиления для каждого фокального закона отсутствует, пытаются решить эту проблему за счет активизации функции ВРЧ (TCG — time corrected gain) во временном интервале, соответствующем задержке призмы, однако такая подстройка весьма неточна, процедура настройки неочевидна, а кривая подстройки усиления не документируется

Для обеспечения равномерности чувствительности в поперечном сечении ОК, прозвучиваемом за счет электронного управления лучом, ФР дефектоскоп должен быть оснащен возможностью документируемой (т. е. легко повторяемой) индивидуальной подстройки усиления для реализуемых фокальных законов.

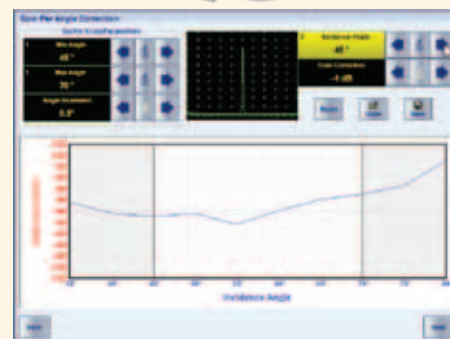


Рис. 7. Пример компенсации усиления при пошаговом манипулировании углом ввода луча — приведение максимизированной амплитуды эхо-сигнала от вогнутого цилиндрического отражателя к стандартному уровню

Статья получена 16 августа 2010 г.