Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решётки

Авторы: Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.

Источник: www.acsys.ru

ВВЕДЕНИЕ

При ультразвуковом (УЗ) контроле опасных производственных объектов важно не только обнаружить вероятный дефект и определить его размеры. Весьма ценной является информация о форме дефекта и его ориентации, если он плоскостный. Эта информация необходима для расчёта прочности конструкции и повышения вероятности правильной оценки её остаточного ресурса [1].

Определить вид и форму дефекта проще по двумерному изображению, которое дают приборы, визуализирующие внутреннюю структуру объекта контроля (ОК).

Из всех приборов этого класса наибольшее распространения получили УЗ дефектоскопы ручного и автоматизированного контроля с фазированными антенными решётками (АР). В этих приборах АР формирует электронноуправляемый УЗ пучок, озвучивающий визуализируемую область ОК под разными углами ввода и из разных точек поверхности ОК [2, 3].

В аппаратуре экспертного контроля, используемой главным образом на атомных станциях, визуализация основана на многоракурсном зондировании ОК сканирующими широконаправленными УЗ преобразователями и когерентной обработке принимаемых сигналов, с реконструкцией изображений сечений контролируемой области. Благодаря сканированию ОК с малым пространственным шагом и использованию при реконструкции изображений не только эхосигналов, отражённых непосредственно от несплошностей материала, но и претерпевших отражения от границ ОК, эта аппаратура обладает большими возможностями по распознаванию характера дефектов [1, 4].

Применение АР для создания систем визуализации внутренней структуры твёрдого материала не ограничено одним лишь методом электронного управления пучком ультразвука. Наряду с ним возможен и успешно применяется метод цифровой фокусировки апертуры АР (ЦФА) [5, 6]. В отличие от приборов с фазированными АР, в аппаратуре, основанной на этом методе, для реконструкции изображения используется полный набор реализаций сигналов, полученных независимо от каждой пары элементов АР. В этих реализациях содержится информация об отражательной способности каждой точки визуализируемой области ОК, озвученной с разных ракурсов, включая УЗ сигналы, многократно отражённые от границ материала. Используя для реконструкции сигналы, прошедшие в ОК разными траекториями, что осуществляется выбором алгоритма реконструкции, удаётся селектировать диффузно отражающие несплошности (соизмеримые с длиной волны ультразвука) от зеркально отражающих, т.е. определять тип отражателя.

УЗ дефектоскоп А1550 IntroVisor [5], основанный на методе вычислительной (цифровой) фокусировки АР, обеспечивает реализацию нескольких алгоритмов реконструкции изображений, благодаря которым оператор может в процессе контроля оценивать характер найденной несплошности.

ЦИФРОВАЯ ФОКУСИРОВКА

Сущность метода ЦФА подробно изложена в [7, 8]. Метод состоит в последовательном зондировании ОК каждым элементом АР, приёме реализаций УЗ сигналов каждым элементом АР независимо от других элементов и использовании всех принятых реализаций в реконструкции изображения путём пространственно-временной их обработки в вычислительном блоке прибора. Рассмотрим здесь основные положения этого метода.

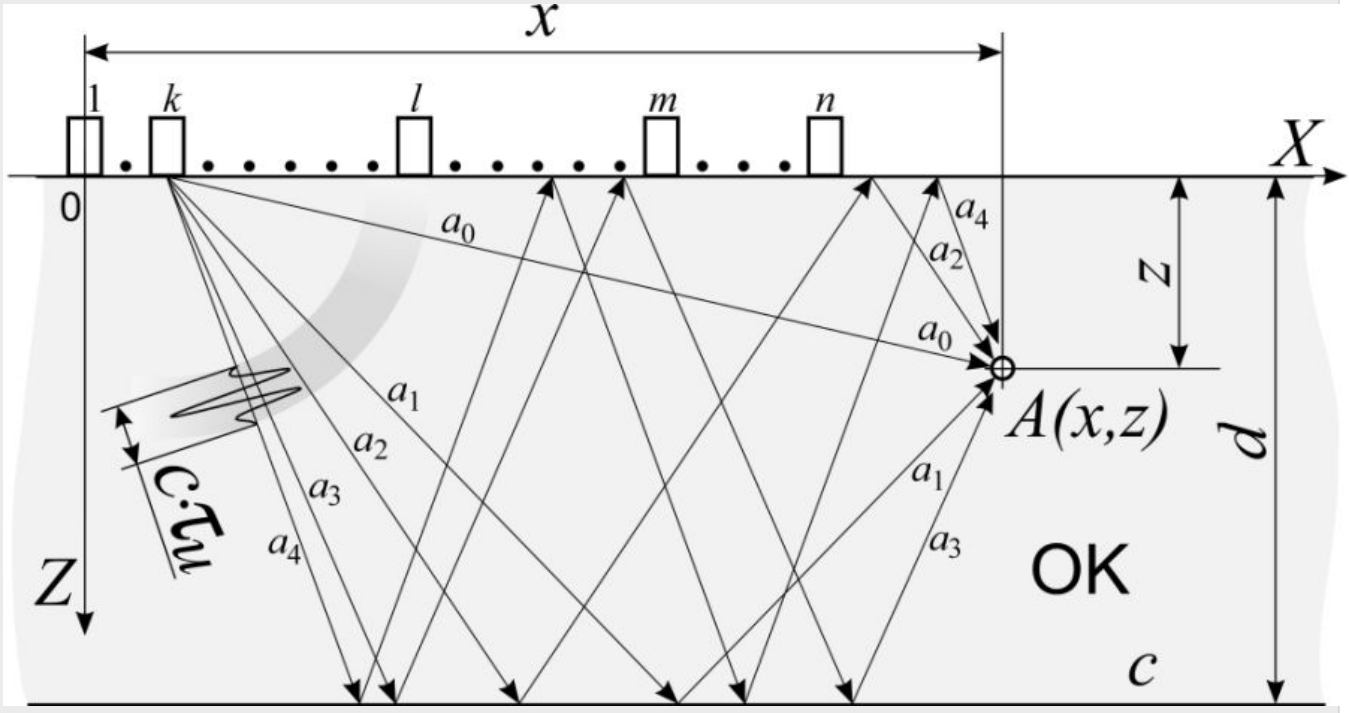


Рис. 1. Схема путей распространения УЗ сигналов в плоском слое твёрдого материала.

На рис. 1, 2 приведены схемы, поясняющие физическую основу метода ЦФА. На поверхности ОК расположена линейная эквидистантная АР, содержащая *n* одинаковых приёмно-излучающих элементов, в качестве которых обычно используются пьезоэлементы. Элементы имеют малую волновую апертуру, поэтому ширина лепестка их диаграммы направленности обычно составляет 50 – 60 градусов.

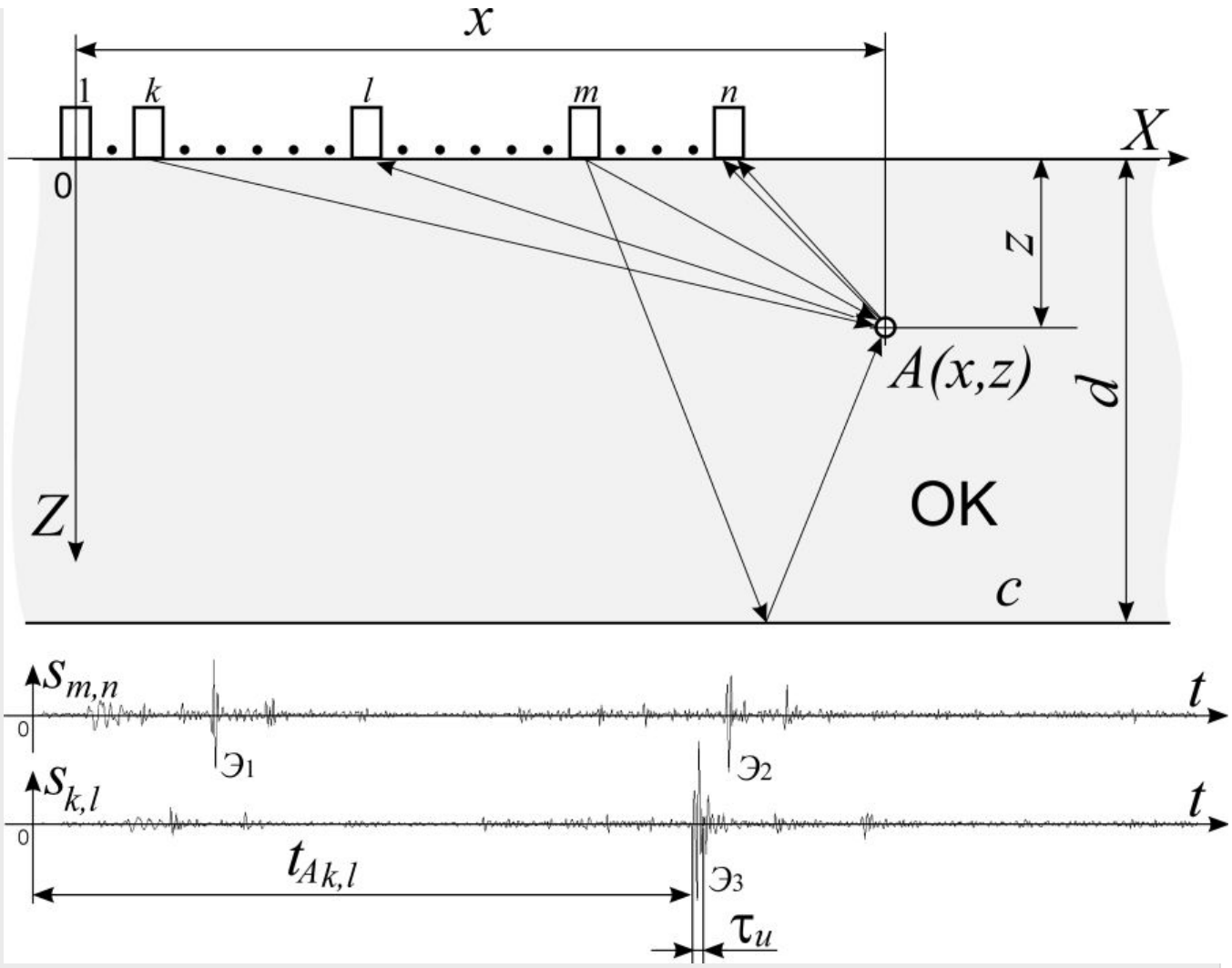


Рис. 2. Примеры траекторий распространения УЗ сигналов и вид реализаций принятых УЗ колебаний.

Для независимого зондирования и приёма УЗ колебаний используют все *n* элементов АР. В результате получают ***N*** реализаций УЗ колебаний от каждой пары элементов АР (излучатель – приёмник), включая и реализации от совмещённой работы элементов в качестве излучателя и приёмника:

$$N = \frac{n \cdot (n+1)}{2}. \quad (1)$$

При наличии в материале ОК в некоторой точке *A(x,z)* с координатами *x, z* какого-либо отражателя (несплошности материала), часть энергии зондирующего импульса отражается обратно в сторону АР. Начало системы координат связано с АР, например, совпадает с фазовым центром первого элемента (крайний слева по рис. 1, 2). Отражённые в сторону АР сигналы распространяются по разным направлениям. К приёмным элементам решётки отражённые сигналы приходят не одновременно, т.к. траектории их распространения имеют разную длину.

Если ОК – плоский слой металла (лист или плита) толщиной *d*, то зондирующий импульс, посланный в ОК, например, элементом *k*, приходит к любому отражателю, расположенному, в частности, в точке *A(x,z)* не только кратчайшим путём (на схеме, рис.1, это путь a_0), но и более длинными путями, претерпевая отражения от донной и внешней поверхностей слоя. Причём таких отражений может быть несколько.

При чётном количестве отражений (на рис. 1 это пути a_2 и a_4), УЗ сигнал падает в точку *A(x,z)* со стороны той же поверхности слоя, где расположена АР (со стороны внешней поверхности). При нечётном количестве (на схеме это пути a_1 и a_3) – со стороны донной поверхности. Очевидно, что существуют пути и с большим количеством отражений УЗ сигнала от границ ОК (на схеме не показаны).

Если шероховатость поверхностей ОК достаточно мала и закон отражения УЗ сигнала от границ ОК можно считать зеркальным, то пространственное расположение точек отражений на каждом пути зондирующего сигнала к точке *A(x,z)* строго определено координатами излучающего элемента АР, координатами точки *A(x,z)* и толщиной слоя материала *d*. Определён этими величинами и сам путь, т.е. его длина.

Согласно принципу взаимности, эти же пути являются путями распространения УЗ сигналов, отражённых от любого отражателя (например, в точке *A(x,z)*) к приёмному элементу АР. Следовательно, траектории распространения УЗ сигналов от элементов АР к любой точке плоскопараллельного ОК и обратно - к АР существуют двух видов: с общим чётным количеством отражений от границ ОК и с общим нечётным количеством отражений.

Если неоднородность материала в точке *A(x,z)* рассеивает УЗ волны диффузно, то возможны траектории обоих видов. Пусть, например, падающий сигнал прошёл по пути с одним отражением (путь a_1 на рис.1), а отражённый – по путям с двумя и тремя отражениями (пути, аналогичные a_2 и a_3 на рис.1). Общее количество отражений УЗ сигнала от границ ОК в траекториях «путь a_1 плюс путь a_2» и «путь a_1 плюс путь a_3», соответственно, три и четыре (нечётное и чётное).

При зеркальном отражении УЗ сигнала от несплошности в точке *A(x,z)* возможны только траектории с общим нечётным количеством отражений, т.к. сигнал, падающий в эту точку со стороны одной границы слоя, отражается в сторону другой границы, и любая траектория складывается из путей с чётным и нечётным количеством отражений. В результате общее количество отражений – нечётное. Здесь следует заметить, что ориентация зеркально отражающей несплошности должна быть вертикальной (перпендикулярной границам ОК) или близкой к ней. Отклонение её от вертикали на 20 и более градусов уводит отражённые сигналы в сторону от АР.

Таким образом, по известным координатам элементов АР, координатам точек в ОК и значению толщины *d* можно вычислить длины любых траекторий распространения УЗ сигналов в ОК при любом количестве отражений от донной и внешней поверхностей ОК. Используя значение скорости распространения УЗ сигналов *c*, можно вычислить и все времена задержек эхоимпульсов от отражателя в точке *A(x,z)* в соответствующих реализациях принятых УЗ колебаний.

Пусть количество отражений УЗ сигнала от донной поверхности ОК на прямом пути его распространения от излучающего элемента АР с номером i к отражателю в точке $A(x,z)$ равно p_i, а количество отражений УЗ сигнала от внешней поверхности ОК на этом же пути равно q_i. Аналогично обозначим количества отражений УЗ сигнала на обратном пути от точки $A(x,z)$ к приёмному элементу АР с номером j: p_j и q_j. Тогда общее количество I отражений УЗ сигнала от обеих границ ОК на прямом пути будет равно: $I = p_i + q_i$, количество отражений от границ на обратном пути: $R = p_j + q_j$. А время задержки эхо-импульса от отражателя в точке $A(x,z)$ в реализации УЗ колебаний, полученной при излучении зондирующего импульса i-тым элементом АР и приёме колебаний j-тым элементом АР при общем количестве ($I + R$) всех отражений УЗ сигнала от границ ОК на всей траектории его распространения, выразится следующим образом:

$$t_{Ai,j}(I,R) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + \left[2\cdot p_i \cdot d + (-1)^{p_i+q_i}\cdot z\right]^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + \left[2\cdot p_j \cdot d + (-1)^{p_j+q_j}\cdot z\right]^2}}{c}, \quad (2)$$

где: x_i, x_j - координаты излучающего и приёмного элементов АР, соответственно.

В частности, для траектории распространения УЗ сигнала с $p_i = 5$, $q_i = 4$, $p_j = 2$, $q_j = 2$, $I = 9$, $R = 4$ формула (2) примет вид:

$$t_{Ai,j}(9,4) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (10\cdot d - z)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (4\cdot d + z)^2}}{c}. \quad (3)$$

На рис. 2 внизу приведены осциллограммы реализаций $s_{m,n}$, $s_{k,l}$ УЗ колебаний, принятых отдельными элементами АР (в частности, для примера, n-ым, и l-ым при излучении зондирующих импульсов m-ым, и k-ым элементами решётки, соответственно). Эти колебания, помимо различных шумов, содержат эхоимпульсы от отражателя в точке $A(x,z)$. Эхоимпульсы $Э_1$, $Э_2$, $Э_3$ (они на рис. 2 превышают по амплитуде шумы) расположены на оси времени с разными задержками $t_{Ai,j}$ относительно моментов посылки в ОК зондирующих импульсов вследствие разных длин траекторий распространения УЗ сигналов в ОК. В частности, эхоимпульс $Э_1$ вызван УЗ сигналом, прошедшим по кратчайшей траектории от АР к отражателю и обратно без отражений от границ ОК, а эхоимпульс $Э_2$ является результатом прохождения УЗ сигнала по траектории с одним отражением от донной поверхности ОК (по траектории типа $a_1 + a_0$). Эхоимпульс $Э_3$ в реализации $s_{k,l}$ как и $Э_1$ является отражением зондирующего сигнала с траекторией типа $a_0 + a_0$ (см. рис. 2). Эхоимпульсы с более длинными траекториями и потому с большими временами задержки $t_{Ai,j}$ в этих реализациях присутствуют, но находятся за верхним пределом отображённого на рис. 2 временного интервала. Длительности эхоимпульсов приблизительно равны длительности зондирующего импульса τ_u.

Реализации $s_{m,n}$, $s_{k,l}$ рис. 2, получены с помощью АР с наклонным вводом ультразвука в ОК. Диаграмма направленности каждого элемента такой решётки заключена в диапазоне углов, приблизительно, от 30 до 85 градусов. Поэтому донные эхоимпульсы в этих реализациях отсутствуют. В реализациях АР других типов, в частности, решёток с прямым (по нормали) вводом УЗ сигналов в ОК, естественно, есть и донные эхоимпульсы.

Если синфазно сложить все эхо-импульсы, пришедшие к АР из точки $A(x,z)$ по всем траекториям от каждой пары элементов АР, то мы получим суммарный эхосигнал $u_A(t)$, амплитуда которого будет характеризовать отражательную способность материала ОК в точке $A(x,z)$. Для этого необходимо выбрать из каждой реализации принятых УЗ колебаний фрагменты $u_{i,j}$ длительностью τ_u, с временами задержки, рассчитанными по формуле (2), совместить фрагменты на оси времени с точностью до фазы и алгебраически сложить соответствующие по времени мгновенные значения колебаний всех фрагментов:

$$u_A(t) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{I=0}^{M}\sum_{R=0}^{M} u_{i,j}\left[t - t_{Ai,j}(I,R)\right], \forall t \in \left[t_{Ai,j}(I,R), t_{Ai,j}(I,R) + \tau_u\right], \quad (4)$$

где M – максимальное количество отражений УЗ сигнала от границ ОК на каждом из путей распространения сигнала к отражателю в точке $A(x,z)$ и обратно, выбранное заранее для ограничения числа используемых траекторий.

Амплитуду U_A полученного суммарного эхосигнала легко определить путём выделения его огибающей и взятия максимума полученной функции. В частности, это можно выполнить с помощью амплитудного детектирования суммарного эхосигнала (выпрямления с низкочастотной фильтрацией) или с помощью синхронного детектирования.

При выполнении изложенных операций для всех точек визуализируемого сечения ОК получается матрица амплитуд суммарных эхосигналов, которая при отображении её на экране в цветояркостной форме представляет собой томограмму визуализируемого сечения ОК. Поскольку в каждую точку томограммы собраны эхосигналы от всех N возможных пар элементов АР, то каждая точка томограммы является результатом фокусировки всей апертуры АР в соответствующую точку сечения ОК.

АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В аппаратуре метод ЦФА реализуется в виде двух процессов: процесса зондирования ОК с приёмом и записью реализаций УЗ колебаний и процесса реконструкции массива данных об отражательной способности точек визуализируемой области ОК. В зависимости от конкретного построения аппаратуры эти процессы могут происходить одновременно, частично перекрываться во времени или даже выполняться в разные периоды времени. Главной особенностью метода является возможность независимого доступа к любому фрагменту каждой принятой реализации УЗ колебаний, что обычно обеспечивается её запоминанием и хранением в течение некоторого периода времени для считывания всех фрагментов, используемых при реконструкции массива данных. Возможен также вариант считывания фрагментов прямо в процессе приёма реализации и разложения их по точкам реконструируемого изображения.

Благодаря независимому доступу к любому фрагменту каждой реализации можно при реконструкции изображения выбирать разные группы фрагментов, соответствующие определённым траекториям распространения УЗ сигналов в ОК [8]. Так, если использовать сигналы с чётным количеством отражений от границ ОК, то в изображении будут присутствовать образы несплошностей, диффузно отражающих УЗ колебания. Если использовать сигналы с нечётным количеством отражений, то на экране будут прорисованы зеркально отражающие несплошности с преимущественно вертикальной ориентацией (по нормали к поверхностям ОК). Т. е. можно реконструировать изображение одного и того же сечения ОК, выделяя отражатели разного вида. Использование всех сигналов, как с чётным, так и с нечётным числом отражений обеспечивает наилучшую прорисовку поверхностей объёмных несплошностей, имеющих сложную форму. Таким образом, меняя алгоритмы реконструкции изображения, можно повысить вероятность правильного определения вида отражателя (точечный, плоскостный или объёмный), по сравнению с алгоритмом визуализации полупространства, когда донная граница ОК находится на большой глубине (d в несколько раз больше апертуры АР) или её поверхность далека от зеркальноотражающей.

В УЗ дефектоскопе A1550 IntroVisor [5] оператору доступны несколько режимов визуализации, которые можно напрямую переключать с клавиатуры:

1. Визуализация полупространства (толщина ОК d не используется);

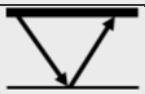
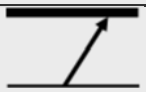
2. Визуализация ОК в виде плиты ($10 < d \le 100$ мм) для обнаружения диффузно отражающих несплошностей;

3. Визуализация ОК в виде пластины (условно $d < 10$ мм) для обнаружения диффузно отражающих несплошностей;

4. Визуализация ОК в виде плиты или пластины ($d \le 100$ мм) для обнаружения зеркально отражающих несплошностей преимущественно вертикальной ориентации;

5. Визуализация ОК в виде плиты или пластины ($d \le 100$ мм) для прорисовки контуров объёмных несплошностей.

Для простой идентификации этих режимов используются символы, приведённые в таблице. Там же даны основные характеристики режимов.

Номер режима	Символ	Объект контроля	Отражатель	Озвучивание
1		полупространство	«точечный»	прямое
2		плита, $10 < d \leq 100$ мм	«точечный»	прямое и отражённое
3		пластина, $d < 10$ мм	«точечный»	отражённое
4		плита или пластина, $d \leq 100$ мм	плоскостный	прямое и отражённое
5		плита или пластина, $d \leq 100$ мм	объёмный	прямое и отражённое

Алгоритмы реконструкции, используемые в этих режимах, и их особенности состоят в следующем. Визуализация полупространства (режим 1) является основным режимом эхоимпульсной томографии. Алгоритм реконструкции в нём построен в предположении всестороннего рассеивания УЗ колебаний каждой точкой пространства. Единственно возможными траекториями распространения УЗ сигналов здесь являются траектории без отражений от границ ОК, состоящие из путей типа a_0 (см. рис. 1). Этот режим наиболее чувствителен к отражателям малых волновых размеров, рассеивающих ультразвук диффузно, таких, как поры, трещины с высотой менее 1 мм и, естественно, зёрна структуры металла. Трещины больших размеров и расслоения отображаются, как правило, только своими кромками, диффузно рассеивающими ультразвук. Поскольку толщина d в этом режиме считается неизвестной, то при наличии донной поверхности все эхосигналы, переотражённые от неё и вследствие этого от внешней границы ОК, дают на экране дополнительные ложные образы на глубинах, превышающих толщину ОК.

Режимы 2 - 5 предназначены для визуализации плоскопараллельных ОК известной толщины, значение которой предварительно устанавливается в меню настройки прибора. В этих режимах используются алгоритмы реконструкции, суммирующие УЗ сигналы, переотражённые от границ ОК.

В режиме 2 производится суммирование сигналов с чётным количеством отражений от границ ОК, включая и сигналы с траекториями без отражений [8]. В этом режиме образы диффузных отражателей дорисовываются на экране прибора благодаря использованию отражений от границ ОК. В результате на экране отображается только действительная область сечения ОК (до глубин, равных толщине d). Образы, вызванные переотражёнными от границ ОК сигналами, отображаются на своих реальных местах. Так, например, боковое отверстие диаметром, большим длины волны ультразвука даёт на экране два образа один под другим: верхний от верхней поверхности отверстия, нижний – от нижней. По расстоянию между этими образами можно судить о диаметре отверстия. Нижняя поверхность объёмной несплошности также отображается на экране на своей действительной глубине, при условии, конечно, её значительной шероховатости для диффузного отражения ультразвука.

Режим 3 отличается от режима 2 тем, что в нём для реконструкции изображения не используются УЗ сигналы непосредственно отражённые от несплошностей, а только переотражённые от границ ОК. Этот режим позволяет вести контроль относительно тонких пластин и сварных соединений с максимально возможной чувствительностью к отражателям малых размеров, дающих слабые сигналы. Поскольку для реконструкции изображения здесь используются сигналы с временами задержки, превышающими время прихода донного сигнала, то собственный реверберационный шум элементов АР не ухудшает качество изображения.

Режим 4 предназначен для прорисовки зеркально отражающих несплошностей, в частности, вертикальных трещин с гладкими поверхностями. В этом режиме используется алгоритм, суммирующий сигналы с траекториями с нечётным общим количеством отражений от границ ОК [8]. Этот алгоритм позволяет отобразить в виде линии всё сечение зеркальноотражающей поверхности, т.к. от каждой точки её сечения эхосигнал благодаря отражениям от границ ОК возвращается к АР прибора. Длина этой линии на экране приблизительно соответствует реальной длине сечения несплошности.

В режиме 5 задействован алгоритм реконструкции, суммирующий все эхосигналы, прошедшие в ОК по всем возможным траекториям, как с чётным, так и с нечётным количеством отражений от границ ОК. Этот режим наиболее полно отображает внутреннюю структуру ОК, т.к. каждая точка этой структуры при наличии в ней неоднородности отражает ультразвук либо диффузно, либо зеркально, либо с обеими составляющими отражённых волн.

Несмотря на то, что режим 5 наилучшим образом прорисовывает границы различных неоднородностей, его использовать в любом случае не следует. При нескольких несплошностях материала изображение на экране может получиться сложным, трудно интерпретируемым. В этом случае, поочерёдно используя режимы 2 и 4 можно во многих случаях распознать, где находится плоскостная несплошность, а где объёмная или несколько малоразмерных.

Все перечисленные режимы визуализации, кроме режима 1, рассчитаны на применение на плоскопараллельных ОК, встречающихся на практике чаще остальных. Естественно, в случае неплоской, например, цилиндрической донной поверхности, при клиновидном ОК или в случаях более сложного профиля объекта, как, например, в [4], эти режимы применять нельзя. Для таких ОК, как показано в [4], необходимо точно задавать геометрию профиля зоны отображения, а при контроле обязательно располагать АР в точно заданном положении. Иначе изображение будет искажённым. Эти задачи специализированного применения аппаратуры могут решаться с использованием дополнительного программного обеспечения. Ниже мы рассмотрим более типичные случаи применения дефектоскопа A1550 IntroVisor на плоскопараллельных ОК.

ТОМОГРАММЫ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Поскольку ОК в виде плит или пластин встречаются на практике чаще объектов с неопределённой или очень большой толщиной, то всегда желательно измерить толщину объекта, ввести её значение в прибор и вести контроль в одном из режимов 2 – 5. Дополнительные преимущества этих режимов, перед режимом визуализации полупространства, кроме адекватности получаемого изображения реальному виду ОК, проиллюстрируем на следующих примерах томограмм, полученных на образцах с точно известными параметрами моделей дефектов.

Все изображения получены с помощью 16-элементной АР поперечных УЗ волн. Направление максимума диаграммы направленности каждого элемента этой АР отклонено от нормали к рабочей поверхности на угол 60^0. Апертура АР в плоскости визуализации (по зарубежной терминологии активная апертура [2]) приблизительно равна 40 мм. Апертура решётки в перпендикулярной плоскости (пассивная [2]) равна 10 мм. Рабочая частота УЗ сигналов равнялась 4 МГц.

По осям координат на приведённых изображениях отложены миллиметры. Горизонтальная ось X направлена вдоль активной апертуры в сторону наклонного излучения УЗ сигналов. Вертикальная ось (в приборе она обозначена Y) – ось глубин. Начало координат приведено к середине апертуры АР. Вследствие особенности прибора А1550, позволяющей увеличивать изображение визуализируемой зоны и размещать его в произвольном положении на экране, не на всех рисунках левый верхний угол изображения совпадает с началом координат.

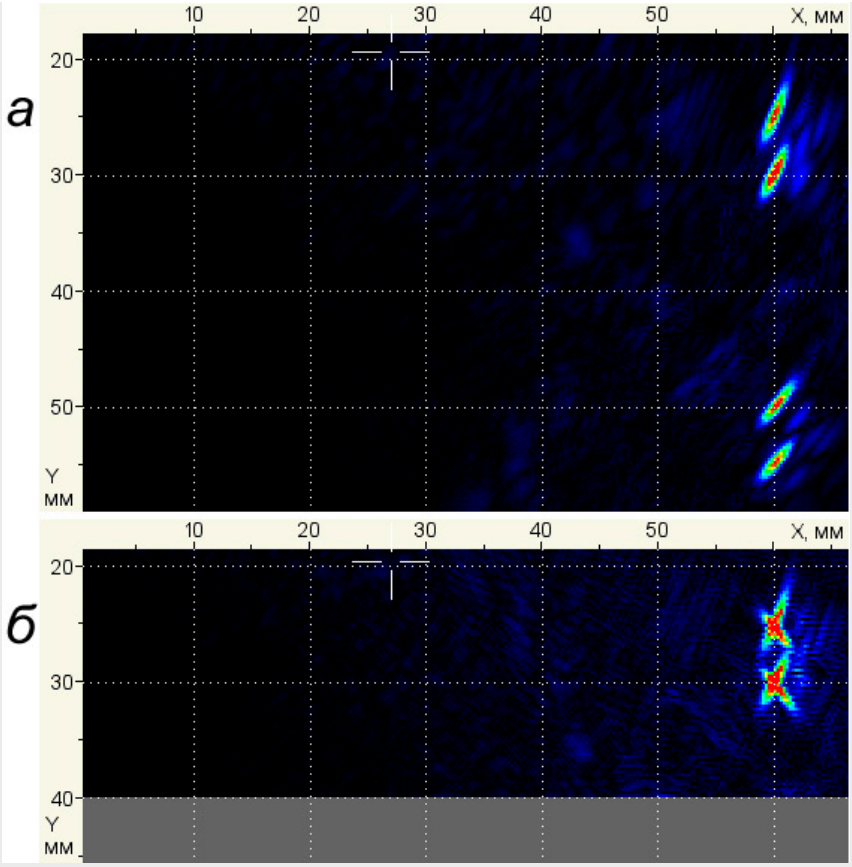


Рис. 3. Томограммы стального плоскопараллельного образца толщиной 40 мм в зоне боковых отверстий, полученные в режиме 1 (*а*) и в режиме 2 (*б*).

На рис. 3 приведены томограммы образца из стали 20 толщиной 40 мм, в котором находятся 2 боковых отверстия диаметром 1,5 мм одно под другим на глубинах 25 и 30 мм. Томограмма на рис. 3*а* реконструирована в режиме визуализации полупространства (в режиме 1), томограмма, рис. 3*б*, - в режиме 2. На рис. 3*а* наряду с образами реальных боковых отверстий на глубинах 24,5 и 29,5 мм (при $x \approx 60$ мм) присутствуют ещё два образа на глубинах 49 и 54 мм. Они вызваны зеркальным отражением УЗ сигналов от донной поверхности, поэтому расположены почти симметрично относительно глубины 40 мм (глубины донной поверхности). Причина несколько меньшей глубины всех образов на изображении в том, что УЗ сигналы отражаются от поверхности отверстий, а не от их центров.

На томограмме, рис. 3*б*, как и должно быть всего два образа отверстий. Нижняя граница изображения расположена на глубине 40 мм, что соответствует реальности. Образы отверстий в виде пересекающихся овальных пятен характерны для отверстий диаметром, немного превышающим длину волны ультразвука (на частоте 4 МГц $\lambda \approx 0{,}8$ мм). При больших диаметрах пятна расходятся вверх и вниз, как бы обрисовывая боковую поверхность отверстия, обращённую к АР. У отверстий меньшего диаметра, как и у точечных отражателей, например, пор в металле, пятна образов пересекаются в центре.

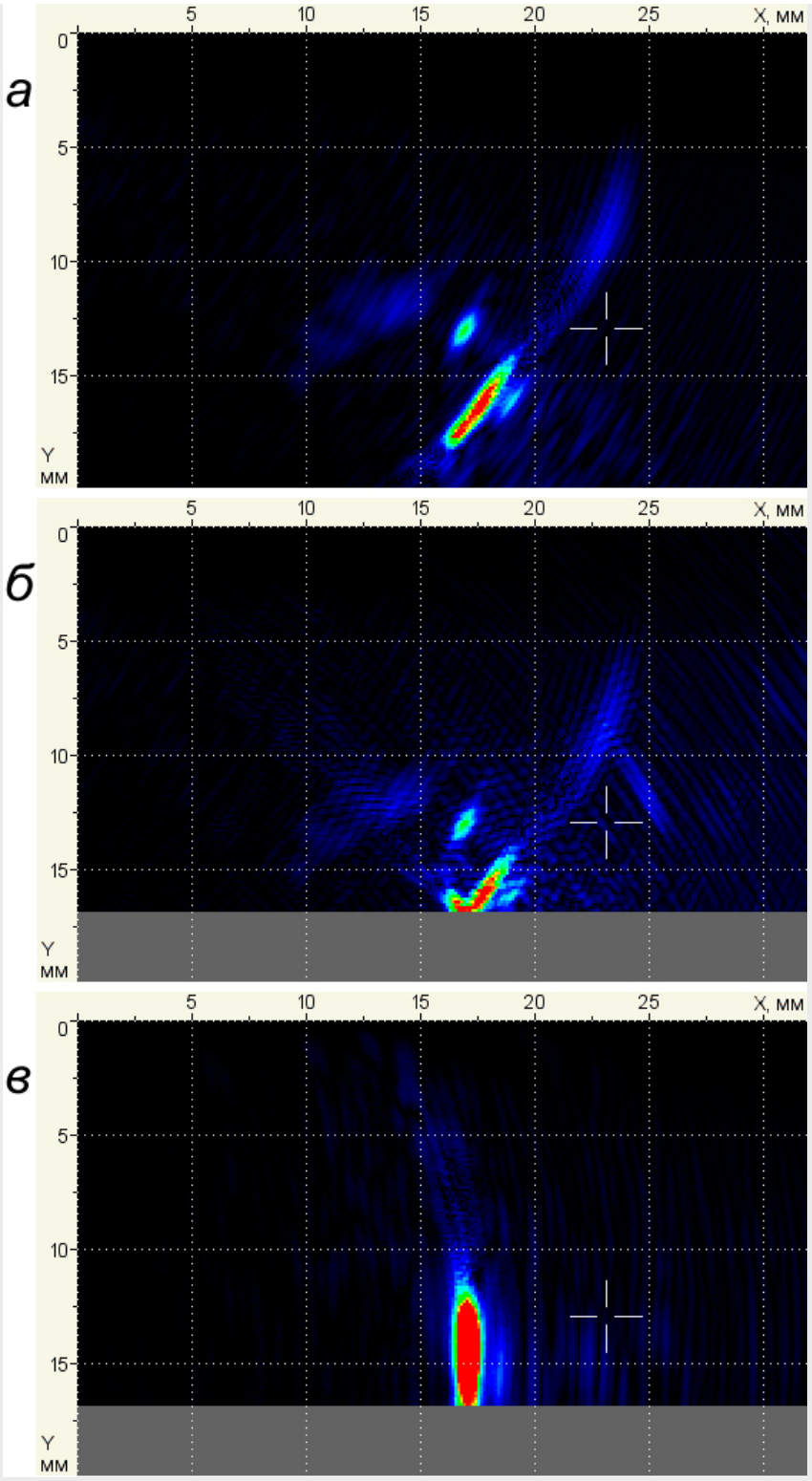


Рис. 4. Томограммы стальной плиты толщиной 17 мм с моделью вертикальной придонной трещины высотой 4 мм, полученные в режимах: *а* – 1; *б* – 2; *в* – 4.

На рис. 4 представлены томограммы модели вертикальной придонной трещины в плите из стали 20 толщиной 17 мм. Модель выполнена электроэрозией и представляет собой щель шириной 0,1 и глубиной 4 мм. Плоскость визуализации ориентирована перпендикулярно плоскости щели. Томограмма на рис. 4*а* получена в режиме 1, томограмма на рис. 4*б* – в режиме 2, а на рис. 4*в* – в режиме 4. При переключении режимов АР оставалась в одном положении.

В режимах 1 и 2 модель отображена двумя образами: нижним, от отражений ультразвука уголковым отражателем щель – донная поверхность, и верхним – от вершины щели (трещины). Вершина щели, как точечный отражатель, естественно даёт менее яркий образ. По его положению на экране легко измерить глубину вершины: курсор в виде «+» (см. рис. 4) установлен на глубине 13 мм. Плоскость щели вследствие зеркального отражения ультразвука не отображена. Изображение, рис. 4*б*, отличается от рис. 4*а* главным образом отсутствием мнимой части изображения ниже уровня донной поверхности (y = 17 мм) и формой образа основания щели в виде символа «✓», более определённо показывающего положение основания щели на горизонтальной оси. Такое представление вертикальных трещин на экране в виде пары образов сильно разной яркости характерно для режимов визуализации диффузно рассеивающих отражателей (режимы 1, 2 и 3).

Совсем другой вид образа модели трещины представлен на рис. 4*в*. Этот образ почти точно передаёт форму и реальную высоту щели. Контур плоской её поверхности полностью прорисован благодаря использованию при реконструкции изображения УЗ сигналов, зеркально отразившихся от каждой её точки. Расстояние до щели от АР легко определить по положению середины образа на оси *x*.

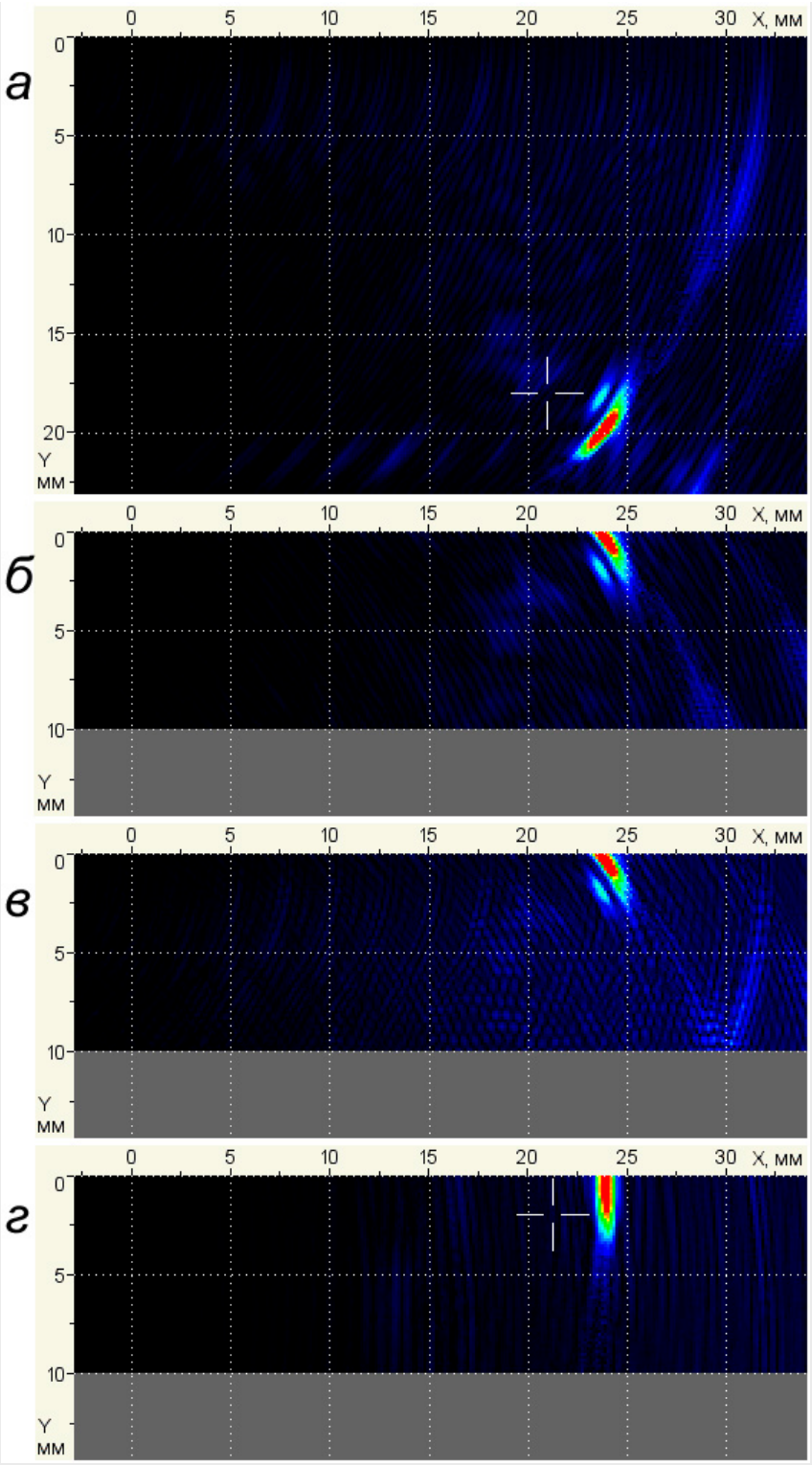


Рис. 5. Томограммы стальной пластины толщиной 10 мм с моделью вертикальной поверхностной трещины высотой 2 мм, полученные в режимах: *а* – 1; *б* – 3; *в* – 2; *г* – 4.

На рис. 5 приведены томограммы модели поверхностной трещины высотой 2 мм в стальной пластине толщиной 10 мм. Образец, моделирующий трещину, выполнен в виде ступенчатого перехода с толщины 10 на толщину 8 мм. АР была установлена на ту же поверхность образца, где расположена ступенька в зоне толщины 10 мм и направлена в сторону ступеньки. Томограмма, рис. 5*а*, получена в режиме 1, томограмма, рис. 5*б*, – в режиме 3, томограмма, рис. 5*в*, – в режиме 2, а рис. 5*г* – в режиме 4.

Образ (точнее пара образов) модели поверхностной трещины сформированы на томограммах, рис. 5*а* - 5*в*, почти исключительно УЗ сигналами, прошедшими с отражениями от донной поверхности. От прямых эхосигналов (с траекториями типа $a_0 + a_0$, см. рис. 1) на томограмме, рис. 5*а*, не видно никакого образа (он должен быть на глубине 2 мм), а на томограмме, рис. 5*в*, образ от вершины трещины (ступеньки) лишь незначительно ярче соответствующих образов на рис. 5*а* и 5*б*. Это особенно видно в сравнении с изображением, рис. 5*б*, которое реконструировано без использования прямых эхосигналов. Пара образов в нём представляют основание (верхний образ) и вершину (нижний) модели трещины. Их координаты соответствуют реальному положению основания и вершины. На изображении режима 1 (рис. 5*а*) они находятся в зоне глубин вблизи удвоенной толщины пластины в перевёрнутом виде (координата *y* курсора «+» равна 18 мм). Образ от вершины, как и в случае модели придонной трещины (ср. рис. 5*а* с рис. 4*а*), намного слабее образа от основания, которое для УЗ сигналов, отразившихся от донной поверхности, является уголковым отражателем. Столь малый вклад прямых сигналов в формирование образа вершины модели поверхностной трещины связан с малой её глубиной (2 мм). Вершина находится, практически, вне лепестка диаграммы направленности элементов АР.

По томограмме на рис. 5*г*, полученной в режиме 4, можно однозначно сказать о выявлении поверхностной трещины. Почти полная прорисовка всего сечения вертикальной плоскости этой модели позволяет измерить и её высоту, равную глубине курсора: 2 мм. Следует заметить, что для повышения

достоверности такого заключения всегда есть возможность включить режим визуализации 2, который чётко отображает границы трещины.

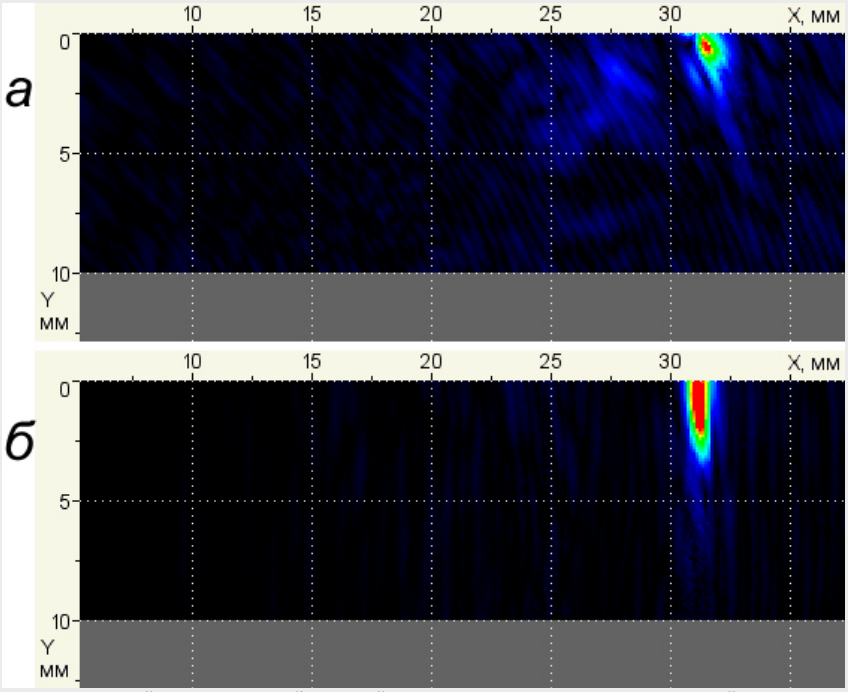


Рис. 6. Томограммы стального СОП толщиной 10 мм с зарубкой глубиной 2 мм на поверхности ввода УЗ колебаний, полученные в режиме 3 (*а*) и в режиме 4 (*б*).

Ещё один пример более адекватного представления зеркально отражающей несплошности показан на рис. 6. Здесь для сравнения результатов работы алгоритмов визуализации диффузно и зеркально отражающих несплошностей использован стандартный образец предприятия (СОП) с зарубкой, расположенной на внешней поверхности пластины из стали 20 толщиной 10 мм. Ширина зарубки 2,5 мм, глубина – 2 мм. Томограммы образца в зоне зарубки получены при расположении зарубки в плоскости визуализации на расстоянии её плоской вертикальной поверхности в 31 мм от центра АР. Томограмма, рис. 6*а*, получена в режиме 3, томограмма, рис. 6*б*, – в режиме 4.

Вершина зарубки на рис. 6*а* представлена образом, соизмеримым с уровнем фона изображения. Поэтому зарубка обнаруживается только благодаря эхосигналам от уголкового отражателя, образованного ею с поверхностью пластины. Дальность зарубки от АР вдоль поверхности пластины, измеренная по изображению, завышена приблизительно на 0,3 мм. Причина этого возможно в том, что образ уголкового отражателя сформирован интерферирующими сигналами поперечных и релеевских волн. Релеевские волны образуются от трансформации поперечных волн, падающих на поверхность металла перед зарубкой.

Образ зарубки на томограмме, рис. 6*б*, вполне отвечает реальной форме и размерам её вертикальной отражающей поверхности. Дальность и высота зарубки могут быть точно измерены по изображению.

В стыковых сварных швах встречаются трещины, не выходящие на поверхности металла и ориентированные вертикально или почти вертикально относительно плоскостей основного металла. Внутренние непровары также имеют подобную ориентацию. Причём контуры плоскостей трещин и несплавлений листов металла имеют очень сложную форму. Поэтому эхосигналы от краёв трещин и несплавлений, как правило, малы. В то же время сами плоскости таких дефектов хорошо отражают ультразвук, только не в обратном направлении, если поверхность гладкая, а к другой поверхности пластины, относительно той, откуда пришла падающая волна.

Для проверки возможности обнаружения таких вертикальных дефектов в металле был изготовлен стальной плоскопараллельный образец в виде бруска толщиной 30 и шириной 40 мм. Все его поверхности обработаны с шероховатостью не более Ra0,63. Один из его торцов имеет фрезерованную впадину, которая моделирует гладкую вертикальную трещину или несплавление внутри металла. Другой торец выполнен наклонённым под углом 75^0 к горизонтальным поверхностям образца. Все двугранные углы, примыкающие к поверхностям, моделирующим несплошности, выполнены с плавными закруглениями с радиусом 5 мм для максимального уменьшения уровня отражённых УЗ сигналов от контуров этих поверхностей.

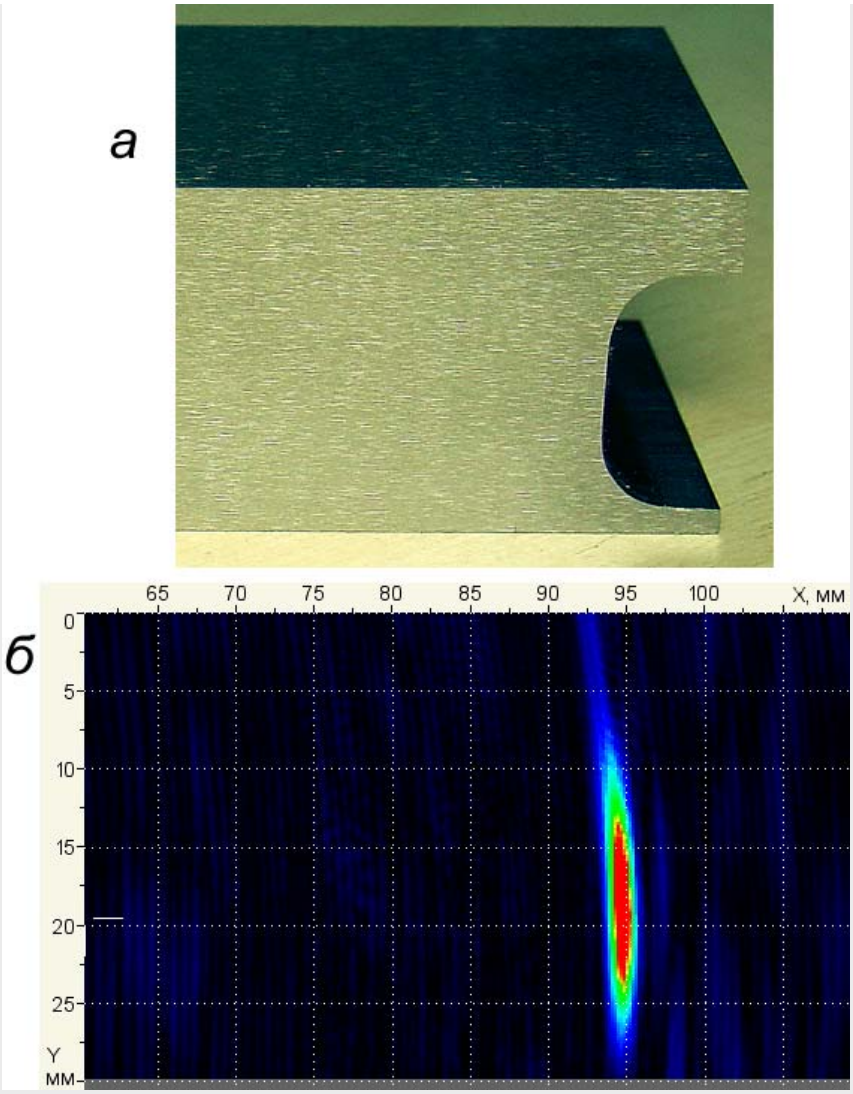


Рис. 7. Стальной образец толщиной 30 мм с моделью внутренней вертикальной трещины высотой 10 мм (*а*) и его томограмма в зоне модели (*б*), полученная в режиме 4.

На рис. 7 приведена фотография профиля образца со стороны торца с впадиной и томограмма, полученная в режиме визуализации 4, при установке АР прибора на верхнюю (по рис. 7*а*) горизонтальную плоскость образца с целью визуализации вертикальной поверхности впадины. Образ сечения плоской вертикальной части поверхности впадины достаточно полно прорисован (см. рис. 7*б*). Глубины краёв плоской части впадины, измеренные по изображению, составляют 13 и 23,5 мм. На самом деле эти глубины равны 12,5 и 22,5 мм. Завышение глубины нижнего края на 1 мм объясняется плавностью перехода плоской вертикальной части поверхности в цилиндрическую, чего не бывает в реальных ОК. Границы трещин всегда острые.

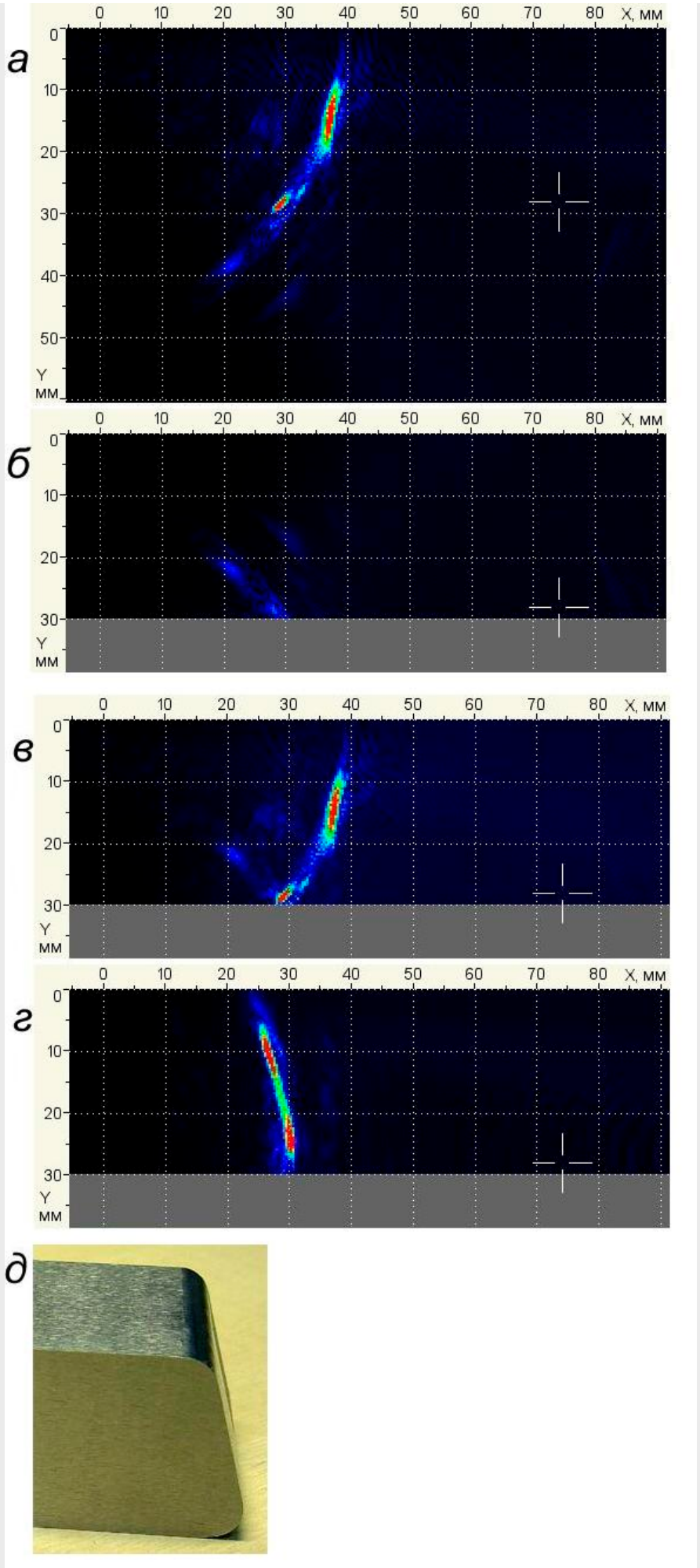


Рис. 8. Томограммы стального образца толщиной 30 мм, отображающие наклонную плоскость его торца (*д*), полученные в режимах: *а* – 1; *б* – 3; *в* – 2; *г* – 4.

Профиль образца со стороны наклонного торца и томограммы, иллюстрирующие разницу в отображении на экране плоской гладкой поверхности, отклонённой на 15^0 от вертикали, разными алгоритмами реконструкции, изображены на рис. 8. Томограмма, рис. 8*а*, получена в режиме визуализации 1, томограмма, рис. 8*б* – в режиме 3, рис. 8*в* – в режиме 2 и рис. 8*г* – в режиме 4. Анализ этих томограмм показывает, что применение алгоритмов для диффузных отражателей (режимы 1, 2 и 3) при поиске зеркально отражающих несплошностей может привести к ошибочным выводам.

Томограммы наклонного торца, полученные в режимах 1 и 2, почти одинаковы (ср. рис. 8*а* и 8*в*). Только слабый фантомный образ томограммы, рис. 8*а*, с координатами (x = 21, y = 39 мм) и такой же по яркости шум в области глубин 32 мм обращены в действительную часть изображения на томограмме, рис. 8*в*. В томограмме, рис. 8*б*, вообще присутствует только этот фантомный образ и шум. Т.к. точки наклонной гладкой поверхности торца не отражают ультразвук в обратном направлении, траектории распространения УЗ сигналов с чётным количеством отражений от верхней (по рис. 8*д*) и донной поверхностей образца, в частности, с двумя отражениями от донной поверхности (траектории типа $a_1 + a_1$, см. рис. 1) отсутствуют. Поэтому образы на томограммах сформированы только от сигналов, прошедших по траекториям с нечётным числом отражений от границ образца, в основном, с одним отражением от донной поверхности по траекториям типа $a_1 + a_0$ и $a_0 + a_1$ (рис. 1), поскольку при толщине образца в 30 мм вклад сигналов с тремя и большим числом отражений достаточно мал. В результате образы от наклонной поверхности образца располагаются на томограммах, рис. 8*а* и 8*в*, на глубинах, меньших толщины образца и имеют координаты, не соответствующие реальным. Только образ на глубине около 28 мм приблизительно соответствует нижнему (по рис. 8*д*) цилиндрическому закруглению двугранного угла. Протяжённый образ на глубинах 11 – 18 мм вообще находится вне области, изображения, соответствующей сечению образца.

Томограмма, рис. 8*г*, хорошо отражает реальное положение и высоту наклонной плоскости торца образца. Длина образа на томограмме почти соответствует этой высоте. Только верхняя часть плоскости торца не до конца прорисована вследствие малого количества УЗ сигналов, вернувшихся от неё к АР. Для получения более полного представления о границах плоских отражателей в металле достаточно передвинуть АР в плоскости визуализации к отражателю или от него.

ВЫВОДЫ

1. При ультразвуковом контроле объектов плоскопараллельной формы (плит, пластин, стыковых сварных соединений) приборами с антенными решётками, сигналы, принятые отдельными элементами решётки, имеют сложную структуру из-за множественности путей распространения зондирующих импульсов к каждому отражателю и эхоимпульсов от него. Вследствие этого в каждой реализации принятых УЗ колебаний присутствуют несколько эхоимпульсов от одного и того же отражателя, прошедшие разными путями, которые несут информацию о его отражательной способности.

2. Алгоритмы метода цифровой фокусировки антенной решётки позволяют использовать эту множественность путей для повышения качества реконструируемых изображений, в том числе для визуализации и дефектометрии зеркально отражающих несплошностей.

3. Раздельный синтез изображений по сигналам «чётных» и «нечётных» траекторий обеспечивает селекцию плоских и объёмных несплошностей без механического перемещения антенной решётки.

Литература

1. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / Под. ред. А.Х. Вопилкина. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.
2. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guide line. – Quebec: R/D Tech Inc., 2004. – 368 p.
3. Х-32 – ультразвуковой дефектоскоп на фазированной решетке (Harfang). – В кн.: Средства акустического контроля: технический справочник. – СПб.: Свен, 2008, с. 130–131.
4. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT, с учётом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля. / Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 39 – 56.
5. Шевалдыкин В.Г., Алёхин С.Г., Бишко А.В., Дурейко А.В., Климентьев А.А., Соколов Н.Ю., Самокрутов А.А. Заглянуть в металл: теперь это просто. / В мире неразрушающего контроля. 2008. № 1 (39). С. 46 – 53.
6. L. von Bernus, A. Bulavinov, D. Joneit, M. Kröning, M. Dalichov, K. M. Reddy. Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. / 9th ECNDT. Berlin. September 25 – 29, 2006. We.3.1.2.
7. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решёток в решении задач УЗК опасных производственных объектов. / В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1 (51). С. 64 – 70.
8. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решётки. / Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21 – 38.