
Оценка несплошностей металла ультразвуковым дефектоскопом с цифровой фокусировкой антенной решетки

Введение

Традиционный УЗК давно и основательно проработан методически. Существует множество книг, инструкций и нормативных документов, регламентирующих контроль и детально поясняющих все его процедуры, чтобы по импульсам А-развертки распознать тип и оценить степень дефектности найденной несплошности.

Уже более 10 лет наряду с традиционными используются приборы, визуализирующие внутреннюю структуру объекта контроля (ОК) [1–7]. На экране такого прибора оператор сразу видит взаимное расположение несплошностей, а иногда и границ материала ОК, оказавшихся в визуализируемом сечении. Координаты и размеры больших (в сравнении с длиной волны) несплошностей он во многих случаях может определить непосредственно по изображению.

Однако, несмотря на геометрическое подобие изображения внутреннему строению ОК, оценку обнаруженных несплошностей по-прежнему ведут, используя, как правило, амплитуду эхо-сигнала на выделенной из всего изображения А-развертке [8, 9]. Само же изображение служит лишь средством поиска и фиксации отражателей — вероятных дефектов. Десятилетиями отработанная нормативная база оценки размеров и браковки несплошностей на основе сравнения амплитуд их сигналов с амплитудой опорного импульса естественным образом перенесена в практику применения визуализирующих приборов. Но если раньше за неимением другой информации, кроме амплитуды и времени задержки эхо-сигнала, величину несплошности приходилось

Сотрудники
ООО «Акустические
Контрольные Систе-
мы», г. Москва:



**Самокрутов
Андрей
Анатольевич**

Генеральный
директор, д. т. н.,
III уровень
по акустическому
и магнитному
видам НК.



**Шевалдыкин
Виктор
Гаврилович**

Заместитель
директора
по научной
работе, д. т. н.

характеризовать эквивалентными и условными размерами, то, получив изображение сечения ОК (томограмму) с образом несплошности, логично и использовать этот образ для всех необходимых оценок.

Если несплошность не превышает длины волны ультразвука, приблизительно оценить ее размеры можно по уровню рассеянного от нее ультразвукового сигнала. Несплошность более одной — двух длин волн рассеивает ультразвук неодинаково по разным направлениям, и уровень отраженного от нее сигнала не имеет однозначного соответствия ее размерам.

При любых размерах несплошностей у визуализирующих приборов с фазированными антенными решетками (АР) [1–6] есть существенное преимущество перед дефектоскопами с традиционными преобразователями. Оно обусловлено электронным управлением ультразвуковым пучком и фокусировкой его в выбранную зону ОК [10]. Облучение зоны и прием эхо-сигналов из нее происходит под разными ракурсами. Поэтому в образ визуализируемой несплошности закладывается информация о форме ее отражающей поверхности.

Еще больше информации о размерах и форме несплошности дают системы с цифровой (вычислительной) фокусировкой апертуры АР, реконструирующие изображения из полного набора независимых реализаций ультразвуковых сигналов от всех элементов АР [7, 11–13]. Эти системы позволяют избирательно комбинировать эхо-сигналы от внутренней структуры металла и фокусировать всю апертуру решетки в каждую точку визуализируемого сечения.

Дефектоскоп «A1550 IntroVisor» реализует метод цифровой фокусировки АР (ЦФА) на основе алгоритма синтезированной фокусируемой апертуры (SAFT) [7, 14, 15]. В этой статье рассмотрены примеры оценки с его помощью размеров и формы несплошностей по параметрам их образов на экране.

Несплошности больших волновых размеров можно оценивать, измеряя размеры их образов и расстояния между характерными точками на экране.

Несплошности малых волновых размеров оцениваются по амплитуде их образов путем сравнения с амплитудами образов от известных дисковых отражателей. Для этого разработана двумерная АРД-диаграмма, которую после всесторонней проверки предполагается встроить в вычислительный процесс дефектоскопа.

Особенности дефектоскопа «A1550 IntroVisor»

Изображения, формируемые на экране дефектоскопа, представляют собой прямоугольный растр. Каждая точка изображения вычисляется как результат фокусировки всей апертуры АР в соответствующую ей точку визуализируемого сечения ОК. Поэтому структура материала ОК адекватно отображается в декартовой системе координат «глубина Z — дальность X до отражателя по поверхности ОК». Яркость (цвет) каждой точки изображения символизирует отражающую способность соответствующей точки ОК.

Реконструкция изображений возможна разными алгоритмами [15]. Наиболее простой из них — синтез фокусировки апертуры АР в предположении отсутствия границ ОК за исключением внешней поверхности, т. е. визуализация сечения полупространства. Этот алгоритм используется в случаях, когда отражений ультразвуковых волн от донной поверхности нет либо они непредсказуемо рассеиваются. Его, естественно, можно использовать всегда, даже если донная поверхность гладкая и находится на известной глубине.

На рис. 1 представлены изображения группы из 8 боковых отверстий диаметром 1 мм, выполненных в бруске из алюминиевого сплава. Изображение слева получено с помощью прямой АР продольных волн. Изображение справа — с помощью наклонной АР поперечных волн. Рабочая частота 4 МГц. Ноль горизонтальной оси соответствует центру активной апертуры АР. На изображениях видны все 8 образов отверстий. Расстояния между крайними отверстиями по горизонтальной оси и по глубине равны 40 мм.

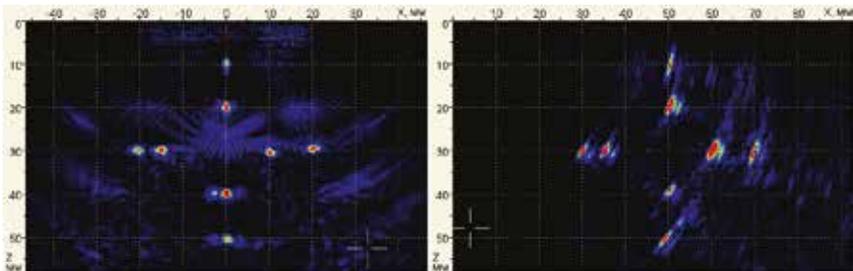


Рис. 1. Томограммы алюминиевого образца с боковыми отверстиями, полученные с использованием прямой АР продольных волн (слева) и наклонной АР поперечных волн (справа)

Если геометрия ОК и его толщина известны, то использование алгоритмов, оперирующих с отраженными от границ ОК ультразвуковыми сигналами, дает не только лучшее качество изображений, но и позволяет оценить форму и ориентацию отражающих поверхностей несплошностей. От количества сигналов, отраженных от донной и внешней поверхностей ОК и используемых при реконструкции, зависит качество изображений: чем их больше, тем выше качество. При обработке сигналов с четным числом отражений прорисовываются на экране диффузно рассеивающие несплошности, а с нечетным — зеркально отражающие. Алгоритм с использованием всех сигналов для реконструкции изображения (мульти-алгоритм) дает максимально близкую к реальности прорисовку контуров несплошностей [15].

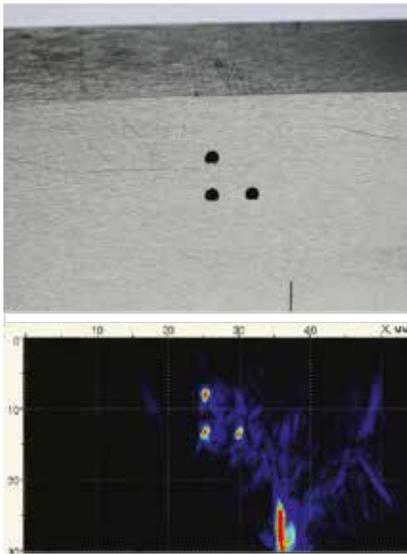


Рис. 2. Образец с моделями дефектов и его томограмма

Рис. 2 иллюстрирует результат реконструкции изображения мульти-алгоритмом. Здесь была использована наклонная АР поперечных волн с номинальной частотой 4 МГц. На фото вверху представлен стальной образец толщиной 30 мм с моделями диффузно и зеркально отражающих несплошностей. Это три боковых отверстия диаметром 1,5 мм и электроэрозионный пропил в донной поверхности высотой 5 мм. Расстояние между центрами отверстий по горизонтали и вертикали 5 мм, глубина верхнего отверстия 7,5 мм. Томограмма этой части образца вполне соответствует реальному расположению и размерам моделей несплошностей.

Оценка несплошностей по их образам на изображении

На реальном ОК при обнаружении какой-либо несплошности ее размеры заранее неизвестны. По образу на экране можно предварительно оценить, чем следует руководствоваться при определении ее размеров. Если образ несплошности, находящейся не далее удвоенного размера

активной апертуры АР (для решеток М9060 и М9065 прибора «А1550 IntroVisor» это 80 мм), вытянут в каком-то направлении более 4–5 мм, то это значит, что несплошность заметно больше длины волны, и ее размер в плоскости визуализации можно измерить непосредственно по экрану прибора. Погрешность измерения в данном случае зависит от того уровня относительно амплитуды образа, по которому будет произведено измерение. Если образ на экране не превышает 3 мм, то несплошность следует оценивать по амплитуде образа, используя двумерную АРД-диаграмму (ДАРД-диаграмму). В граничных случаях или при наклонной дальности несплошности более двух размеров апертуры АР можно использовать обе возможности оценки и выбирать результат, лежащий ближе к границе брака.

При визуализации диффузно рассеивающих несплошностей (пор, боковых отверстий малого диаметра) их образы обычно имеют форму эллипса, вытянутого в направлении нормали к прямой, соединяющей центр апертуры АР и центр образа (рис. 1). Степень вытянутости (эксцентриситет) эллипса зависит от расстояния между центром АР и несплошностью, т. е. от наклонной дальности до отражателя. Малая ось эллипса зависит, в основном, от длительности зондирующих импульсов прибора, а от дальности зависит слабо. Большая ось зависит от угла, под которым «видна» апертура АР из точки расположения несплошности. С увеличением наклонной дальности или при уменьшении глубины при постоянной наклонной дальности этот угол уменьшается, и большая ось образа возрастает.

Несплошности, обладающие небольшой направленностью индикатрисы рассеяния, например, трещины с размерами около 2–3 длин волн ультразвука, дают образы на экране, приближающиеся по форме и ориентации к поверхностям несплошностей, попавшим в визуализируемое сечение. Экспериментальные исследования по оценке соответствия плоских отражателей таких размеров своим образам на экране дефектоскопа проводились на стальных образцах с плоскодонными отверстиями, выполненными под разными наклонами к поверхности ввода ультразвуковых колебаний. Использовался алгоритм визуализации полупространства. Образы донышек отверстий получались вытянутыми и меньше походили на эллипсы, чем образы диффузно рассеивающих отражателей — боковых отверстий. Их форма больше похожа на отрезок прямой и, что более важно, наклон образа почти соответствует

наклону донышка, а длина близка к размеру его в плоскости визуализации. Причем при увеличении наклонной дальности этот размер образа незначительно возрастает. И чем больше диаметр отверстия, тем меньше размер образа зависит от дальности.

На рис. 3 приведены томограммы пары боковых отверстий диаметром 1,5 мм в образце из стали 20 при наклонной дальности до ближайшего отверстия 60 мм (вверху) и дальности 173 мм (внизу). Между отверстиями 10 мм. На рис. 4 приведены томограммы пары торцевых плоскодонных отверстий диаметром 3 мм при наклонной дальности 55 мм (вверху) и 125 мм (внизу). Дугообразные образы на томограммах рис. 4 принадлежат цилиндрической поверхности образца, с которой просверлены отверстия. Все эти четыре томограммы реконструированы алгоритмом визуализации полупространства. Контроль вели на поперечных волнах наклонной АР с номинальной частотой 4 МГц.

Образы боковых (рис. 3) и торцевых (рис. 4) отверстий по форме отличаются мало. Образы боковых отверстий все же более компактны, чем образы плоскодонных отверстий, особенно при небольшой наклонной

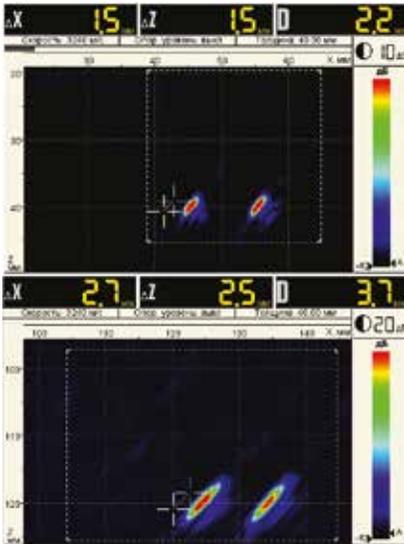


Рис. 3. Образы боковых отверстий диаметром 1,5 мм в стали при наклонной дальности до ближнего отверстия 60 мм (вверху) и 173 мм (внизу)

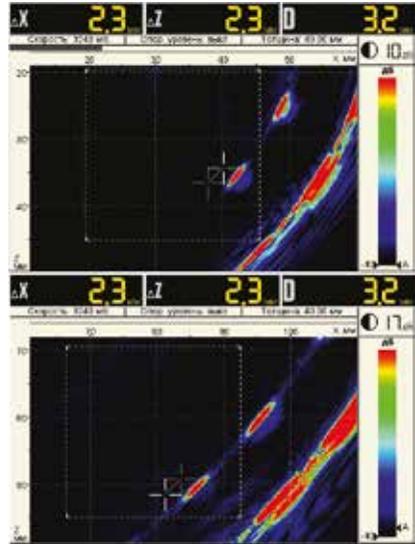


Рис. 4. Образы торцевых плоскодонных отверстий диаметром 3 мм в стали при наклонной дальности до ближнего отверстия 55 мм (вверху) и 125 мм (внизу)

дальности (ср. верхние томограммы на рис. 3 и 4). Но размеры образов боковых отверстий при малой и большой дальности отличаются заметно: при малой дальности — 2,2 мм, при большой — 3,7 мм. Эти размеры индицируются в правом верхнем углу изображений. Размеры же образов плоскостных отверстий при малой и большой дальностях мало отличаются (рис. 4). Нижние по рис. 4 образы вообще оказались равными. Кроме размеров их наклон относительно вертикали весьма близок к реальному наклону донышек отверстий. Это особенно заметно на верхней томограмме рис. 4.

При достаточно больших размерах несплошностей — примерно более трех длин волн колебаний (при частоте 4 МГц в стали — это более 3 мм), их ориентацию в ОК и реальные физические размеры в плоскости визуализации в большинстве случаев можно определить по положению и размерам образов на экране.

На рис. 5 приведены томограммы стыковых сварных соединений с несплошностями, полученные наклонной АР поперечных волн на частоте 4 МГц. Материал соединений — углеродистая сталь. Толщина основного металла 12 мм. Здесь использован четный алгоритм визуализации, отображающий диффузно рассеивающие несплошности.

На томограмме слева по рис. 5 виден образ несплавления по левой кромке сварного шва. Его протяженность в плоскости визуализации 5,1 мм. На томограмме справа — образ непровара в корне шва высотой 2,9 мм. Действительные размеры несплошностей, как и на предыдущих рисунках, определены непосредственно с помощью экранного измерителя. Расстояние между измерительными маркерами индицируется в правом верхнем углу изображения. Ось шва соответствует координате $x = 35$ мм.

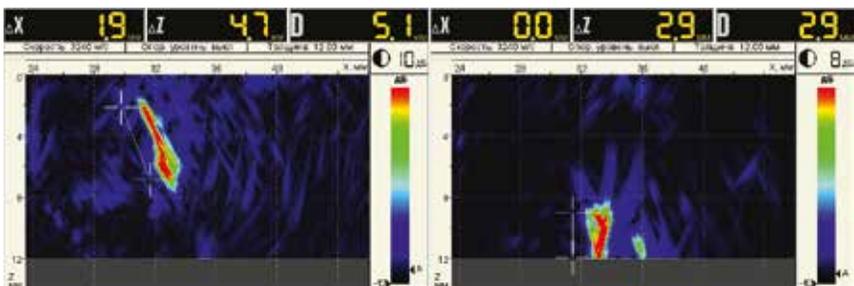


Рис. 5. Томограммы дефектных стыковых сварных швов

По этим томограммам можно сделать выводы и о наклонах несплавления в кромке шва и непровара в корне. Угол наклона легко вычисляется по разностям координат концов образа, в которые нужно установить экранные маркеры. Видно также, что образ на томограмме рис. 5 слева не прямой, а несколько изогнут. Вследствие неровной границы несплавления вся ее поверхность отражает ультразвуковые колебания в сторону АР, поэтому и форма границы, попавшая в визуализируемое сечение, воспроизведена достаточно отчетливо.

Идентифицировать объемную несплошность труднее, так как ее более удаленная от АР поверхность не отображается. В этом случае вид образа ближайшей поверхности может указать на характер несплошности. Дополнительно может помочь анализ изображений, реконструируемых разными алгоритмами.

На рис. 6 показаны фрагменты трех томограмм одной и той же поверхности крупной несплошности в стальной плите толщиной 40 мм, полученные наклонной АР. Томограмма слева реконструирована четным алгоритмом, т. е. обработкой сигналов только с четным числом отражений от границ плиты. Томограмма в центре рис. 6 вычислена нечетным алгоритмом (использованы сигналы только с нечетным числом отражений). Томограмма справа вычислена мульти-алгоритмом [15].

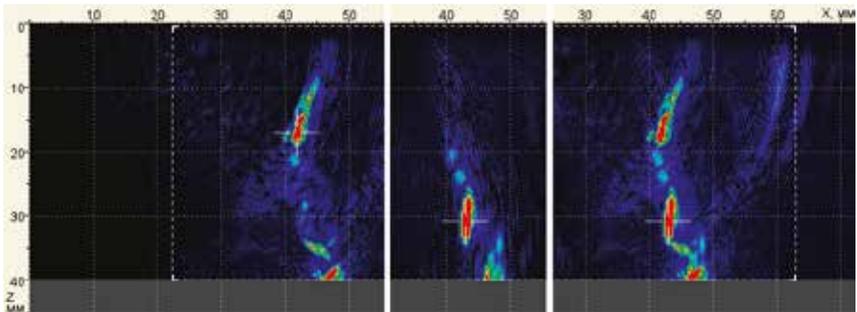


Рис. 6. Томограммы крупной несплошности в стальной плите толщиной 40 мм, реконструированные четным (слева) и нечетным (в центре) алгоритмами, а также мульти-алгоритмом (справа)

Из приведенных на рис. 6 изображений можно сделать вывод о характере этой несплошности: сложная форма образа скорее всего принадлежит объемной несплошности с преимущественно неровными поверхностями. Но на глубинах от 26 до 35 мм ее поверхность имеет плоский

почти вертикальный участок, который хорошо отобразился нечетным алгоритмом (на томограмме в центре). Грубые участки поверхности отображены только четным алгоритмом (на томограмме слева). Причем образ на глубинах от 10 до 19 мм совсем не проявился на томограмме в центре. Это указывает именно на то, что эта часть поверхности несплошности рассеивает ультразвук диффузно — значит, ее неровности порядка длины волны. Почти горизонтальный образ на томограмме слева с координатами $x \approx 45$ мм, $z \approx 35$ мм тоже принадлежит участку грубой поверхности. Мульти-алгоритм (томограмма справа рис. 6) позволил прорисовать все участки несплошности. Распил плиты открыл раковину высотой примерно 30 мм. Форма ее поверхности вполне соответствовала приведенным изображениям.

Для лучшей идентификации неизвестных несплошностей всегда следует просматривать их по возможности по разным направлениям сечений.

Оценка несплошностей малых волновых размеров

Размеры несплошностей, соизмеримых с длиной волны и меньших, невозможно определить путем прямых измерений размеров их образов на экране визуализирующего дефектоскопа. Такие несплошности, например, не более 1,5 мм при частоте 4 МГц, на экране дефектоскопа «A1550 IntroVisor» дают образы в виде сосредоточенных пятен, аналогичных образам на рис. 1. А при достаточно большом их удалении от АР — более двух — трех размеров ее активной апертуры, образы, вследствие естественного ухудшения фокусировки, приобретают вытянутую форму, как на нижней томограмме рис. 3. Поэтому, как и в традиционной дефектоскопии, такие несплошности можно характеризовать только эквивалентными размерами и оценивать их по амплитудам образов на экране.

Для этого логично использовать ДАРД-диаграмму, с помощью которой сравнивать амплитуды образов найденных несплошностей с амплитудами образов дисковых отражателей с такими же координатами x и z расположения в материале, как и оцениваемые несплошности. Поскольку амплитуды образов зависят от двух аргументов (координат x и z), то диаграмма представляет собой семейство двумерных функций.

Для проверки возможностей оценки таких несплошностей по амплитудам их томографических образов наиболее подходят модели дефектов в виде плоскостонных отверстий. Они хорошо имитируют сосредоточен-

ные (непротяженные) трещины в металле, не выходящие на внешнюю и донную поверхности ОК. В то же время их достаточно легко изготовить с любой ориентацией относительно поверхности ввода колебаний в ОК. Кроме того, оцененный эквивалентный размер модели можно сразу непосредственно сравнить с реальным размером имитирующего плоскодонного отверстия.

Двумерная АРД-диаграмма

Для разработки ДАРД-диаграммы с целью внедрения ее в вычислительный процесс прибора «A1550 IntroVisor» было выполнено численное моделирование алгоритма реконструкции изображения с образцом дискового отражателя для наклонной АР при использовании короткого (в три полупериода) зондирующего сигнала. Моделирование было выполнено для дисков диаметрами 1,8; 2,3; 3,0 и 3,6 мм с углами наклона акустических осей 45, 60 и 70°. Координаты дисковых отражателей задавались в диапазонах от 10 до 100 мм по дальности X и глубине Z . Рассчитанные амплитуды образов сравнивались с амплитудами, измеренными с помощью «A1550 IntroVisor» на образцах с соответствующими плоскодонными отверстиями. Результаты удовлетворительно совпали. Максимальные отличия амплитуд расчетного и измеренного образов не превысили 4 дБ. А в большинстве случаев они оказались намного меньшими.

ДАРД-диаграмма была построена также экспериментально по результатам измерений амплитуд образов плоскодонных отверстий, выполненных в наборе специально изготовленных образцов с различным удалением отражающих доньшек отверстий от точки пересечения их акустических осей с поверхностью ввода ультразвуковых волн. Расположение доньшек в образцах по технологическим причинам было задано в системе координат глубина z — наклонная дальность r . Поэтому ДАРД-диаграмма была построена в этой системе координат. Отверстия в образцах выполнены с диаметрами 1,8; 2,3; 3,0; 3,6; 4,2 и 5,0 мм. Наклонные дальности доньшек следующие: 30, 40, 55, 75, 100 и 125 мм. Значения амплитуды образов для промежуточных дальностей были получены двумерной полиномиальной аппроксимацией. Для каждой наклонной дальности был изготовлен отдельный образец из стали 20. Чертеж самого большого из образцов с наклонной дальностью отражателей 125 мм приведен на рис. 7.

которых измерена диаграмма. Результат в виде эквивалентного диаметра или площади индицируется на экране прибора.

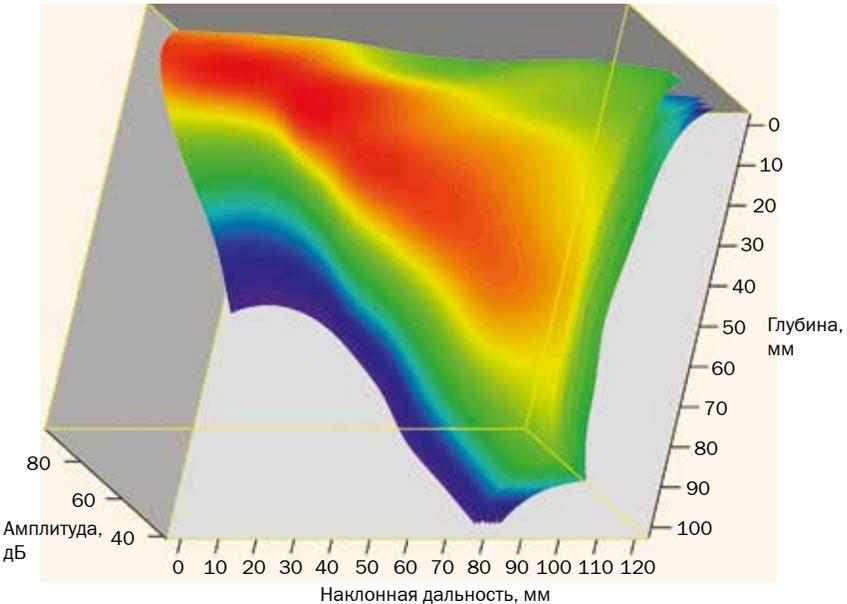


Рис. 8. Двумерная АРД-диаграмма, полученная экспериментально с использованием образцов с плоскодонными отверстиями диаметром от 1,8 мм до 5 мм

Учет влияния затухания и качества акустического контакта

Расчетная и экспериментально снятая ДАРД-диаграммы показали на практике близкие результаты. Для более точных оценок в прибор предварительно необходимо вводить значение затухания поперечных волн в материале, а также поправку на шероховатость поверхности ОК.

Затухание в материале ОК не всегда можно измерить с достаточной для практики точностью. Поэтому учесть его можно путем калибровки прибора на опорном отражателе в материале, из которого изготовлен ОК.

Шероховатость поверхности ОК влияет на уровень принятых ультразвуковых сигналов аналогично влиянию качества акустического контакта. Автоматически следить за уровнем принятых АР сигналов можно, анализируя амплитуды сигналов головных волн, распространяющихся между элементами АР. Время их прихода для каждой пары элементов точно из-

вестно, а амплитуда зависит от качества контакта этих элементов с поверхностью ОК. Причем на головную волну не оказывает никакого влияния рабочая поверхность АР, присоединенная к поверхности ОК. Для приема сигналов головных волн не требуется отдельного зондирования ОК. Эти сигналы содержатся в рабочих реализациях принятых колебаний. И их только нужно использовать в вычислительном процессе.

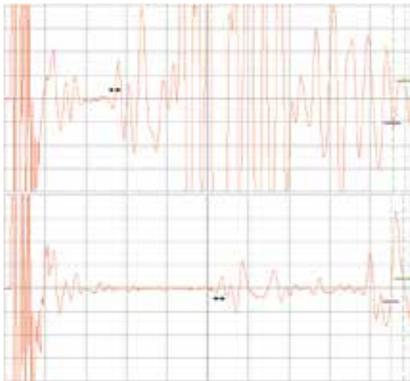


Рис. 9. Осциллограммы реализаций ультразвуковых колебаний, принятые 6-м элементом наклонной АР от зондирующего импульса 1-го ее элемента (вверху), и 15-м элементом от зондирующего импульса 4-го элемента. Масштаб по горизонтали: 1 мкс/дел, масштаб по вертикали: 5 мВ/дел

На рис. 9 в качестве примера приведены осциллограммы колебаний, принятых 6-м элементом наклонной АР при возбуждении 1-го элемента и 15-м элементом при возбуждении 4-го элемента.

Первые периоды сигналов головных волн, прошедших от 1-го к 6-му элементу и от 4-го к 15-му обозначены на осциллограммах двунаправленными стрелками. Эти периоды находятся в интервалах времени 2,4–2,73 мкс и 4,9–5,27 мкс соответственно. Видно, что анализ их амплитуд в процессе контроля вполне возможен.

Применение двумерной АРД-диаграммы

Практическое использование ДАРД-диаграммы имеет свои особенности в сравнении с обычной АРД-диаграммой. В отличие от наклонных преобразователей, обладающих узкой диаграммой направленности, область высокой чувствительности прибора с ЦФА достаточно широка.

В традиционной дефектоскопии при обнаружении несплошности обычно находят положение преобразователя, при котором получается максимум амплитуды эхо-сигнала. Этот максимум сравнивают с сигналом от эквивалентного дискового отражателя, считая его перпендикулярным акустической оси пучка преобразователя и расположенным так, что эта ось проходит через центр отражателя. Вследствие узкой диаграммы направленности преобразователя максимум эхо-сигнала ярко выражен.

При контроле прибором «A1550 IntroVisor» максимум образа несплошности найти труднее. При расположении несплошности на некоторой глубине наклонная дальность до нее при перемещении АР по поверхности ОК может меняться в широких пределах при небольших изменениях амплитуды образа. Это видно из диаграммы на рис. 8. И положение АР, дающее максимум амплитуды образа несплошности, будет в значительной степени зависеть от индикатрисы рассеяния несплошности. Поэтому дисковым отражателем, эквивалентным данной несплошности, будет выбран тот, который при таких же координатах расположения при построении ДАРД-диаграммы был ориентирован своей акустической осью в центр апертуры АР и обеспечил такую же амплитуду образа, как и несплошность.

Плавное, без хорошо выраженного максимума изменение амплитуды образа отражателя при перемещении АР по поверхности ОК имеет и положительное свойство.

Погрешность оценки эквивалентного размера несплошности по ДАРД-диаграмме при неточном нахождении максимума также слабо зависит от сдвига АР относительно ее «правильного» положения, дающего максимум амплитуды образа. Так, например, если валик усиления сварного шва не позволил довести АР до «правильного» положения, то несколько меньшая амплитуда образа несплошности должна дать заниженное значение эквивалентного размера. Но более удаленный от АР дисковый отражатель такого же размера, моделирующий данную несплошность, также дал бы несколько меньшую амплитуду образа. Поэтому и несплошность будет оценена этим эквивалентным отражателем практически без ошибки. Причина этого в том, что отражатель, где бы он ни находился, всегда располагается в фокусе апертуры АР.

На рис. 10 приведено изображение с экрана «A1550 IntroVisor», где представлена томограмма плоскопараллельного стального образца толщиной 76 мм с отклоненным от вертикали на угол в 25° плоским торцом. В этом торце выполнено плоскодонное отверстие диаметром 2,6 мм и глубиной 16 мм.

Образец с наклонным торцом можно считать моделью толстостенного сварного шва с трещиной, которая имитируется плоскодонным отверстием. Изображение получено с помощью наклонной АР с рабочей частотой 4 МГц. Коэффициент затухания поперечных волн в стали образца приблизительно оценен в 20 дБ/м.

Образы доньшка отверстия и наклонного торца хорошо видны. Координаты доньшка и амплитуда А, дБ, его образа индицируются над томограммой.

Торец образца можно считать моделью непровара по правой (по изображению) кромке шва. При перемещении АР к торцу и от него отображаются, соответственно, верхняя и нижняя части торца. Так можно оценить высоту «непровара». Причем в реальности непровар или трещина обычно имеют более грубые и шероховатые поверхности, чем данный шлифованный торец образца. Поэтому для оценки высоты реального непровара перемещения АР может не потребоваться.

При взаимном расположении доньшка отверстия и АР, представленном на рис. 10, был получен максимум амплитуды образа доньшка. На этом максимуме автоматически установился экранный маркер. По ДАРД-диаграмме эта модель небольшой трещины оценена эквивалентным диаметром диска в 2,8 мм или эквивалентной площадью в 6,3 мм². Эта оценка достаточно близка к реальному диаметру (2,6 мм) отверстия. Эквивалентная площадь получилась завышенной на 16%.

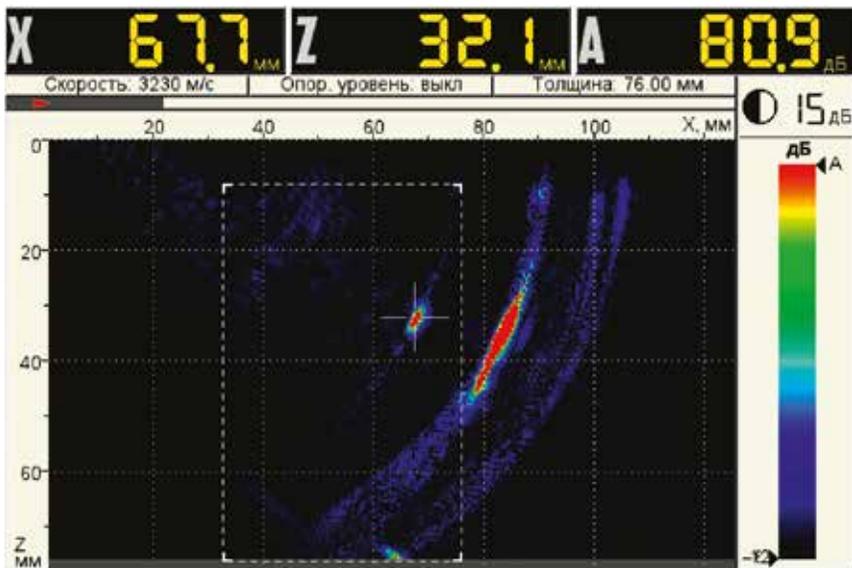


Рис. 10. Изображение с экрана дефектоскопа «A1550 IntroVisor» с томограммой стального образца толщиной 76 мм в зоне наклонного торца с плоскодонным отверстием диаметром 2,6 мм

Выводы

Ультразвуковой дефектоскоп с цифровой фокусировкой антенной решетки позволяет:

- измерять реальные размеры несплошностей в несколько длин ультразвуковых волн по размерам их образов на экране;
- оценивать эквивалентные размеры несплошностей, соизмеримых с длиной волны, по двумерной АРД-диаграмме;
- реконструировать изображения разными алгоритмами для оценки типа несплошности.

Литература

1. OmniScan® MX — модульный дефектоскоп (Olympus NDT). — В кн.: Средства акустического контроля/Технический справочник. — СПб: СВЕИ, 2008, с. 124–126.
2. EPOCH 1000 — дефектоскоп общего назначения (Olympus NDT). — Там же, с. 114–116.
3. HARFANG veo — система ультразвукового контроля с фазированными решетками (Sonatest)/Реклама. — В мире НК. 2012. № 2 (58). С. 35.
4. Phasor XS — фазированные решетки (GE Inspection Technologies)/Реклама. — В мире НК. 2008. № 2 (40). С. 58.
5. Portable Flaw Detector USM Vision.
6. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/usm-vision.html>
7. ISONIC — серия портативных дефектоскопов общего назначения (Sonotron NDT). — В кн.: Средства акустического контроля/Технический справочник. — СПб: СВЕИ, 2008, с. 117–120.
8. A1550 IntroVisor — универсальный ультразвуковой томограф (АКС). — Там же, с. 68–69.
9. Moles M. Manual phased arrays for weld inspections using North American codes. — In: 17th WCNDT, Shanghai (China).
10. Пасси Г. С. Технология фазированных решеток — современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке. — В мире НК. 2009. № 2 (44). С. 56–64.
11. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guide line. — Quebec: R/D Tech Inc., 2004. — 368 p.
12. Bernus L. von, Bulavinov A., Joneit D. et al. Sampling Phased Array. A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. — In: 9th ECNDT. — Berlin, 2006. We.3.1.2.
13. Karasawa H., Ikeda T., Matsumoto S. et al. 3D-SAFT Ultrasonic Inspection Equipment «Matrixeye™». — In: 7th Internat. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. — Yokohama (Japan), 2009 (JRC-NDE 2009).
14. Lines D., Wharrie J., Hottenroth J. et al. Real-Time Ultrasonic Array Imaging using Full Matrix Capture and the Total Focusing Method. In: Proc. of 2nd Aircraft Airworthiness & Sustainment Conf. — San Diego, 2011.
15. Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов. — В мире НК. 2011. № 1. С. 64–70.
16. Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки. — Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21–38.