

А.А. Самокрутов, д.т.н., генеральный директор; В.Г. Шевалдыкин, д.т.н., ООО «Акустические Контрольные Системы»

Особенности оценки несплошностей металла

Применение появившихся относительно недавно визуализирующих ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов с фазированными антенными решетками (ФАР) заметно облегчило процедуру поиска и определения координат дефектов благодаря более информативному и наглядному томографическому способу отображения информации о несплошностях металла [1].

Наряду с приборами на основе ФАР существует аппаратура, основанная на других принципах УЗ-зондирования и обработки принятых сигналов [2–4]. В ней также используются антенные решетки (АР), но режим их работы иной. Визуализирующий УЗ-дефектоскоп А1550 IntroVisor [5] реализует метод цифровой фокусировки антенной решетки (ЦФА).

Суть метода – в поэлементном зондировании решеткой объема объекта контроля (ОК) при независимом (многоканальном) приеме УЗ-колебаний всеми элементами АР и в формировании изображения, сфокусированного в каждую точку сечения ОК в результате вычислительного процесса [6, 7].

Благодаря такому принципу действия (а именно – фокусировке во все точки визуализируемого сечения ОК) А1550 IntroVisor обладает многими преимуществами перед приборами с ФАР. Одно из них – лучшее качество изображения по всему полю, что облегчает идентификацию форм и размеров относительно крупных несплошностей. Второе – это реальная возможность применения двумерной АРД-диаграммы (ДАРД-диаграммы) для оценки размеров несплошностей, соизмеримых с длиной волны. Для систем с ФАР, оперирующих ограниченным количеством фокальных законов, ДАРД-диаграмма применима лишь к небольшой части сфокусированного изображения.

ДАРД-диаграмма представляет собой семейство зависимостей амплитуды (яркости) образов дисковых отражателей разных диаметров от двух координат их расположения в пространстве: глубины и поверхностной дальности, т.е. расстояния от центра апертуры АР до проекции отражателя на поверхность ОК.

Экспериментальные исследования по оценке вида несплошностей и измере-

нию их размеров показали, что для несплошностей, больших двух длин волн УЗ-колебаний, эти оценки возможны по размерам образов несплошностей на экране. При соизмеримости отражателя с длиной волны можно говорить только о его условных размерах, эквивалентных размерам дисковых отражателей (плоскодонных отверстий), которые можно оценивать по ДАРД-диаграмме, разработанной для прибора А1550 IntroVisor.

На реальном ОК при обнаружении какой-либо несплошности ее размеры заранее неизвестны. По ее образу на экране можно предварительно оценить, чем следует руководствоваться при определении ее размеров. Если образ 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, это значит, что несплошность заметно больше длины волны. Поэтому 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 имеет на экране протяженность менее 3–4 мм, то несплошность следует оценивать по амплитуде образа, используя 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.

Оценку размеров, формы, ориентации и прочих показателей, больших в сравнении с длиной волны несплошностей металла, можно проводить непосредственно по томограмме с

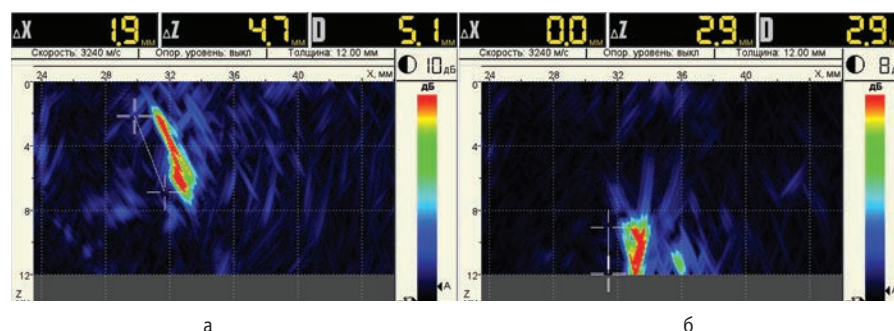


Рис. 1. Томограммы образца с боковыми отверстиями, полученные прямой АР продольных волн (а) и наклонной АР поперечных волн (б)

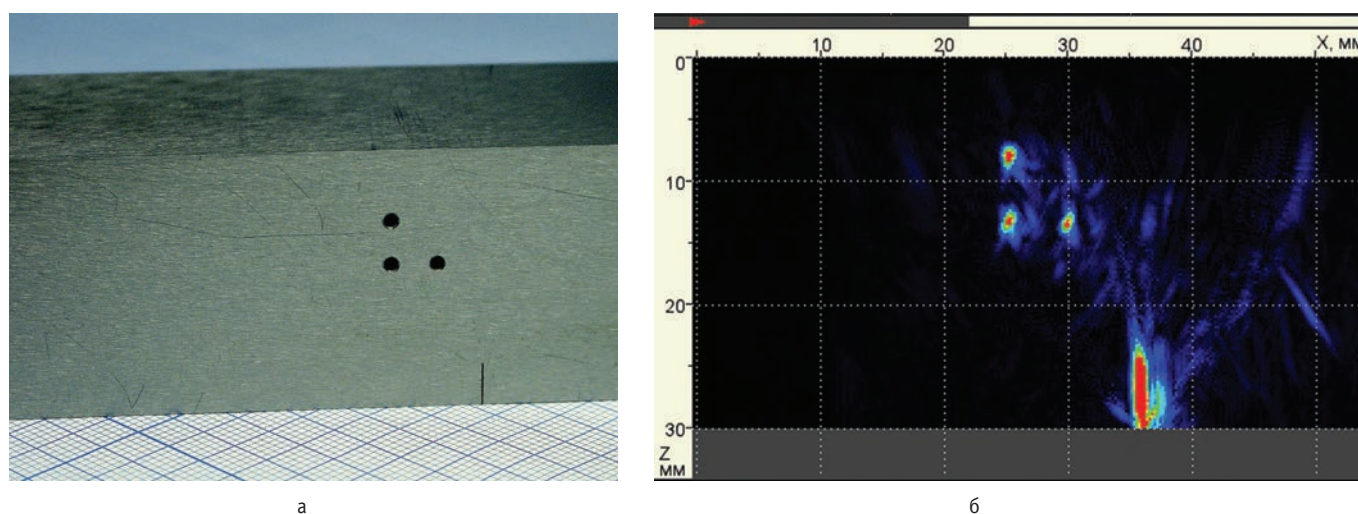


Рис. 2. Образец с моделями дефектов (а) и его томограмма (б)

их образам. Для иллюстрации этого на рисунке 1 приведены томограммы стыковых сварных швов с достаточно большими дефектами, действительные размеры которых легко определить непосредственно с помощью экранного измерителя. Материал соединений – углеродистая сталь. Толщина основного металла – 12 мм. На томограмме слева на рисунке 1 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. Штриховые линии обозначают положение оси шва. Расстояние между измерительными маркерами индексируется в правом верхнем углу изображения.

По этим томограммам можно сделать выводы и о наклоне несплавления в кромке шва и непровара в корне. Угол наклона легко вычисляется по разностям координат концов образа, в которые нужно установить экранные маркеры. На рисунке 1 слева эти маркеры для лучшей заметности вынесены за пределы образа несплавления. Видно также, что этот образ не прямой, а несколько изогнут. Вследствие неровной границы несплавления вся ее поверхность отражает УЗ-колебания в сторону АР, поэтому и форма границы, попавшая в визуализируемое сечение, воспроизведена достаточно отчетливо.

Для более полной прорисовки поверхностей гладких трещин в приборе

предусмотрены специальные режимы, при которых изображение реконструируется с использованием УЗ-сигналов, отражающихся от трещин зеркально или наряду с зеркальным отражением еще и диффузно [7]. Результат такой реконструкции виден на рисунке 2, где электроэрозионный пропил у донной поверхности образца прорисован полностью.

Идентифицировать объемную несплошность труднее, т.к. ее более удаленная от АР поверхность не отображается. В этом случае вид образа ближайшей поверхности может указать на характер несплошности, например, изогнутой в сторону АР формой.

Оценивать несплошности, соизмеримые с длиной волны, можно только по амплитудам их образов на экране, т.к. форма и размеры образов мало связаны

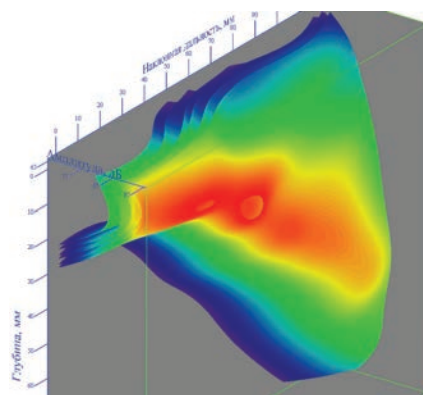


Рис. 3. Двухмерная АРД-диаграмма, полученная экспериментально с использованием образцов с плоскодонными отверстиями диаметром 1,8–5 мм

с формой и размерами самих несплошностей.

Для проверки возможностей оценки таких несплошностей по амплитудам их томографических образов наиболее подходят модели дефектов в виде плоскодонных отверстий. Они хорошо имитируют сосредоточенные (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 УЗ-колебаний в ОК. Кроме того, оцененный эквивалентный размер модели можно сразу непосредственно сравнить с реальным размером имитирующего плоскодонного отверстия.

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

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

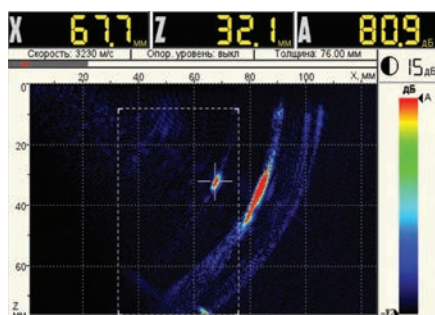


Рис. 4. Изображение экрана УЗ-дефектоскопа А1550 IntroVisor с томограммой образца в зоне наклонного торца с плоскодонным отверстием

диаграммы направленности преобразователя максимум эхосигнала ярко выражен.

При контроле прибором А1550 IntroVisor [5] максимум образа несплошности найти труднее. При ее расположении 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 рисунке 3. 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 экви-

валентного 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 рисунке 4 приведено изображение экрана А1550 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 УЗ поперечных волн в стали образца приблизительно оценен в 20 дБ/м.

Образы дна отверстия и наклонного торца хорошо видны. Координаты дна и амплитуда его образа индицируются над томограммой. Торцеобразца можно

считать моделью непровара по правой (по изображению) кромке шва. При перемещении АР к торцу и от него отображается, соответственно, верхняя и нижняя части торца. Так можно оценить высоту непровара.

При взаимном расположении дна отверстия и АР, представленном на рисунке 4, был получен максимум образа от дна отверстия. На этом максимуме автоматически установился экраный маркер. По ДАРД-диаграмме эта модель 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%.

Таким образом, практически необходимую оценку несплошностей металла разных волновых размеров можно и с приемлемой точностью выполнять непосредственно по экрану визуализирующего УЗ-дефектоскопа, основанного на методе цифровой фокусировки АР. Размеры, форма, амплитуда и взаимное расположение образов несплошностей несут информацию, достаточную для такой оценки.



000 «Акустические
Контрольные Системы»
115598, г. Москва,
ул. Загорьевская, д. 10, корп. 4
Тел./факс: +7 (495) 984-74-62
e-mail: market@acsys.ru
www.acsys.ru

Литература:

1. Пасси Г.С. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 2 (44). – С. 56–64.
2. Bernus L. von, Bulavinov A., Joneit D., Kröning M., Dalichov M., Reddy K.M. Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging // 9th ECNDT. – Berlin. – September 25–29, 2006. – We.3.1.2.
3. Karasawa H., Ikeda T., Matsumoto S., Hamajima T., Isobe H. 3D-SAFT Ultrasonic Inspection Equipment MatrixeyeTM // 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. – Yokohama, Japan. – May 12–15, 2009. – JRC-NDE 2009.
4. Lines D., Wharrie J., Hottenroth J., Skramstad J., Goodman R., Wood N. Real-Time Ultrasonic Array Imaging using Full Matrix Capture and the Total Focusing Method // Proceedings of 2nd Aircraft Airworthiness & Sustainment Conference. – San Diego. – April 18–21, 2011.
5. Высокочастотный ультразвуковой томограф А1550 IntroVisor. – http://acsys.ru/production/?type_id=16&subtype_id=7&product_id=106.
6. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокуров А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1. – С. 64–70.
7. Самокуров А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 21–38.