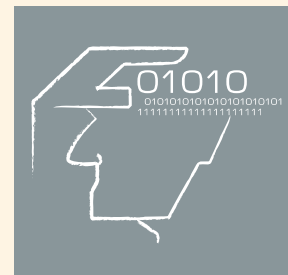


Use of Wave Diffraction for an Ultrasonic Flaw Measurements when Developing Coherent Algorithms of Recovery of High-Quality Images of Reflectors

E. G. Bazulin,
A. Kh. Vopilkin,
D. S. Tikhonov

Рассмотрены вопросы визуализации и определения реальных размеров отражателей при УЗК, также особенности дефектоскопов с ФАР и ЦФА при обработке измеренных эхо-сигналов. Приведено подробное описание реализации методов C-SAFT и M-C-SAFT на дефектоскопах с ЦФА. Примеры получения изображений от реальных и искусственных дефектов хорошо проиллюстрированы, что позволяет получить полное представление о функциональных возможностях ультразвуковой дефектометрии.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ВОЛН ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОГЕРЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва:



**Базулин
Евгений Геннадиевич**

Начальник научно-методического отдела,
к. ф.-м. н.



**Вопилкин
Алексей Харитонович**

Генеральный директор, д. т. н., профессор.
Научные интересы — методы и средства
определения параметров дефектов, разра-
ботка ультразвуковых автоматизированных
систем с когерентной обработкой данных



**Тихонов
Дмитрий Сергеевич**

Технический директор, к. т. н.

Введение

Один из вариантов получения информации об отражателях в контролируемом объекте заключается в получении их изображений при излучении и приеме ультразвуковых импульсов. Любой дефектоскопист был бы рад готовить протоколы контроля, анализируя изображение отражателей, по которому можно однозначно определить их форму, а также измерить их размеры с точностью не хуже чем половина длины волны. Для получения изображений необходимо разработать аппаратуру для излучения и приема эхо-сигналов в пределах заданной пространственной апертуры, разработать алгоритм реконструкции и реализовать его в программном обеспечении. Для уменьшения влияния человеческого фактора на интерпретацию результатов контроля целесообразно разработать надежные алгоритмы распознавания и определения размеров отражателей. И чем выше качество восстановленных изображений отражателей, тем надежнее будут работать алгоритмы распознавания.

В основе любого алгоритма восстановления изображения отражателей лежит модель акустического тракта, описывающая излучение ультразвукового импульса, его взаимодействие с дефек-

том и прием эхо-сигналов. Простейшие алгоритмы реконструкции основаны на теории геометрической оптики (ГО) [1]. Однако после взаимодействия падающей волны с отражателем возникают импульсы, которые невозможно описать в рамках геометрической оптики в терминах отражения и рефракции. Точная теория дифракции весьма сложна и позволяет получать аналитические решения только для таких идеальных объектов как клин, цилиндр или сфера. Поэтому для приближенного расчета рассеянных полей для широкого круга отражателей «произвольной» формы была разработана геометрическая теория дифракции (ГТД) [2]. ГТД позволяет в алгоритме реконструкции изображения отражателей учитывать эффекты многократного отражения импульсов от границ объекта контроля, рефракцию лучей в анизотропной среде распространения, зеркального отражения от поверхности отражателей и, конечно, дифракционные эффекты. Обработывая измеренные эхо-сигналы при разных положениях излучателя и приемника, можно восстановить изображение отражателей.

Для описания акустических схем с отражением ультразвуковых импульсов от дна и поверхности объекта контроля будем пользоваться следующими обо-

значениями: такое событие, как преломление на поверхности или отражение от поверхности, будем обозначать буквой T , а буквой B будем обозначать отражение от дна. Тип волны после события будем обозначать буквами L (продольная) и S (поперечная). Запись $T(S) - T(L)$ обозначает обычный прямой луч на поперечной волне при излучении и с приемом на прямом луче, но уже продольной волны ($m_t = 0, m_r = 0$). Схема $TB(LL) - TB(TSSS)$ описывает ситуацию, когда при излучении рассматриваются лучи однократно отраженные на продольной волне, а при приеме — двукратно отраженные на поперечной волне ($m_t = 1, m_r = 2$); акустическая схема $T(L) - TB(SL)$ соответствует схеме, называемой «самотандем» [3] ($m_t = 0, m_r = 1$). Акустическую схему, описывающую распространение головной волны вдоль поверхности, будем обозначать как $TT(LS)$, а вдоль дна — $BB(LS)$.

Корреляционный метод восстановления изображения дефектов

Для визуализации отражателей применяются системы, основанные на обработке эхо-сигналов при механическом сканировании одноэлементным пьезопреобразователем [4], и приборы, работающие с использованием фазированных антенных решеток (ФАР) [5–8]. Благодаря электронному управлению лучом, дефектоскоп с ФАР формирует изображения S-типа с частотой более 20 Гц, что делает очень привлекательным его применение для ручного и автоматизированного УЗК.

Но существует и альтернативный подход восстановления изображения отражателей с применением антенных решеток. На первом этапе регистрируются эхо-сигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решетки, так называемый **режим двойного сканирования** [9]. Восстановить изображение отражателей на втором этапе по измеренным эхо-сигналам можно методом **комбинированного SAFT** (C-SAFT) [10]. Такой принцип восстановления изображения можно называть цифровой фокусировкой антенной решеткой (ЦФА), а приборы, формирующие изображение по такому принципу, будем называть дефектоскопами с ЦФА [6, 11]. Сравнительный анализ свойств дефектоскопов с ФАР и с ЦФА приведен в работах [12, 13]. Регистрация эхо-сигналов при перемещении антенной решетки, работающей в режиме двойного сканирования вдоль оси x , будем называть режимом **тройного сканирования**.

Возникает вопрос: «Какая из технологий ФАР или ЦФА более перспективна для получения высококачественных изображений?». С точки зрения авторов статьи колоссальным преимуществом обладают дефектоскопы с ЦФА, благодаря тому, что дефектоскопы с ФАР позволяют работать только со сформированными изображениями, а дефектоскопы с ЦФА позволяют обрабатывать измеренные эхо-сигналы по самым разным алгоритмам. Стремительное развитие вычислительной техники последние все более и более быстродействующими.

Решение обратной задачи рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}_i, t)$, расположенным в области S_i , и по измеренному в области S_t рассеянному полю $p(\mathbf{r}_t, t)$ найти функцию $\varepsilon(\mathbf{r})$, описывающую отражающие свойства неоднородности в области S .

Один из распространенных методов оценки функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(\mathbf{r}_t, t)$. Пусть решение прямой задачи, то есть расчет рассеянного поля $p(\mathbf{r}_t, t) = p(\mathbf{r}_t, t; \mathbf{r}_i)$ по известным функциям $q(\mathbf{r}_i, t)$ и $\varepsilon(\mathbf{r})$, в формальном виде можно записать следующим образом

$$p(\mathbf{r}_t, t) = P\{\varepsilon(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_i, t)\}. \quad (1)$$

Помещая точечный отражатель в произвольную точку \mathbf{r}_i , то есть полагая $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$, можно оценить вид функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ по корреляционной формуле

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \iiint_{S_i, S_t} p(\mathbf{r}_t, t) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t) d\mathbf{r}_i d\mathbf{r}_t dt; \quad (2)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t) = P\{\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), q(\mathbf{r}_i, t)\}.$$

Функция $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$ зависит от формы излученного импульса $S(t)$ и должна учитывать эффекты отражения, преломления и трансформации типов волн, анизотропии акустических свойства материалов, затухания звука, наличия нескольких областей с разными акустическими свойствами. Чем точнее удастся решить прямую задачу (1) на основе выбранного варианта описания дифракционных эффектов, тем больше объектов контроля, в которых можно восстанавливать высококачественные изображения отражателей.

Метод C-SAFT

Если при расчетах функцию S_t заменить на $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} — время нарастания импульса, и рассматривать только одну акустическую схему, то выражение (2) превращается в формулу, описывающую метод C-SAFT или, в случае $\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_t$, метод SAFT:

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \iiint_{S_i, S_r} p(\mathbf{r}_t, t) \delta((t - t_{\text{del}}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t)) + t_{\max}) d\mathbf{r}_i d\mathbf{r}_t dt = \iint_{S_i, S_r} p(\mathbf{r}_t, t - t_{\text{del}}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t) + t_{\max}) d\mathbf{r}_i d\mathbf{r}_t, \quad (3)$$

где $t_{\text{del}}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t)$ — время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приемнику для заданной акустической схемы. При таком подходе задача восстановления изображения отражателей сводится к многократному решению прямой задачи для функции $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ при заданном числе отражений от границ объекта контроля при излучении и приеме.

При каждом отражении от границы объекта контроля может происходить трансформация типа падающей волны. Это означает, что при m_t отражениях максимальное число возможных комбинаций списка скоростей $\{c_i\}_{m_t} = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,m_t+1}\}$ равно 2^{m_t} , и учет всех возможных вариантов скоростей на трассе значительно увеличивает время формирования изображения. Однако ситуация значительно упрощается, если принять во внимание два следующих обстоятельства. Во-первых, импульс распространяется за одинаковое время по многим траекториям для объекта одинаковой толщины. Время распространения определяется не порядком следования отрезков траектории с заданными скоростями звука, а зависит от количества отрезков, вдоль которых звук распространяется либо как продольная волна, либо как поперечная волна. Акустические схемы, которые имеют разные времена распространения импульса вдоль траектории, будем называть **независимыми**. Так при излучении и пяти отражениях ($m_t = 5$) от границ плоскопараллельного образца из 32 возможных путей только 10 будут независимы. Во-вторых, зависимость коэффициента отражения $V(\alpha; c_{i,n}, c_{i,n+1})$ от угла падения приводит к тому, что при многократных отражениях останутся **значимыми** амплитуды эхо-импульсов только тех акустических схем, для которых произведение всех коэффициентов отражения $V(\alpha; c_{i,n}, c_{i,n+1})$ будут составлять 20 или 30% от максимального значения. И чем больше число отражений m_t или m_r , тем больше будет разница между амплитудами эхо-сигналов по разным акустическим схемам. Список из независимых и значимых акустических схем состоящий из N_{as} пар списков скоростей $\{c_i\}_{m_t} = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,m_t+1}\}$ и $\{c_i\}_{m_r} = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,m_r+1}\}$ обозначим как $\{L_{\text{as}}\}$.

Метод M-C-SAFT и TS-M-C-SAFT

Метод получения высококачественных изображений по многим акустическим схемам рассмотрен в статье [14] и назван в ней методом M-C-SAFT. Он представляет собой упрощенный вариант корреляционной обработки (2), когда функция $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$ рассчитывается для множества независимых и значимых

акустических схем. Итоговое изображение отражателя определяется как модуль когерентной суммы парциальных оценок $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_j\}, \{c_i\})$ для списка акустических схем $\{L_{as}\}$ длиной N_{as} по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{\{L_{as}\}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \{c_j\}, \{c_i\}) \right| \quad (4)$$

Если антенная решетка перемещается N_s раз для разных значений вектора \mathbf{r}_s , определяющего положение призмы на объекте контроля, то, добавив когерентное суммирование изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки, можно получить объединенное (итоговое) изображение отражателей с еще более высокой фронтальной разрешающей способностью по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{s=1}^{N_s} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_j\}, \{c_i\}) \right| \quad (5)$$

К сожалению, воспользоваться формулой (4) или (5) на практике удается не всегда по причине того, что в объекте контроля не известны с необходимой точностью ни скорости продольной и поперечной волн, ни его толщина. Чем на большем расстоянии от антенной решетки нужно восстанавливать изображение и чем больше отражений от границ нужно учесть, тем с более высокой точностью должны быть известны скорости продольной и поперечной волн. В статье [15] дана оценка требуемой точности измерения скоростей, которая должна быть не меньше чем 0,5%. Это очень высокая точность измерений! Ситуация усугубляется еще и тем, что толщина реального объекта контроля, как правило, известна лишь приблизительно. Поэтому формулу (5) можно модифицировать, введя не простое сложение (когерентное или по модулю), а логическое сложение, выполняемое следующим образом. Для каждого парциального изображения, число которых равно $N_{as} N_s$, вводится уровень отсечки, равный его среднему значению плюс три дисперсии. Если в точке \mathbf{r}_i отличны от нуля значения не менее чем в N_i парциальных изображений, то в точку объединенного изображения записывается сумма модулей всех парциальных изображений. В противном случае итоговое значение в точке \mathbf{r}_i полагается равным нулю. Такой примитивный подход позволяет существенно уменьшить амплитуды ложных бликов, но, с другой стороны, он несет в себе опасность пропустить блики от реальных отражателей. Как показал опыт, значение параметра N_i целесообразно выбирать равным $N_{as} N_s / 3$. Таким образом, формула формирования итогового изображения с помощью логического сложения модулей парциальных изображений может быть записана так

$$I(\mathbf{r}_i) = \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{\{L_{as}\}} \left| \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_j\}, \{c_i\}) \right|, \\ \text{если } \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{\{L_{as}\}} \text{sign} \left| \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; \{c_j\}, \{c_i\}) \right| \geq N_i; \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Метод минимизации невязки

Принципиальное ограничение методов типа C-SAFT заключается в том, что при решении прямой задачи все расчеты проводятся для точечных отражателей, что не позволяет учесть реальную форму несплошности. Дальнейшее развитие корреляционного метода заключается в применении методов оптимизации. Решением задачи (1) будет считаться функция $\hat{\varepsilon}_\chi(\mathbf{r})$, позволяющая достичь минимального различия между измеренным полем $p(\mathbf{r}, t)$ и его оценкой:

$$\hat{\varepsilon}_\chi(\mathbf{r}) = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_{i,z}}} \{\chi^2[\hat{\varepsilon}(\mathbf{r})]\}, \quad (7)$$

где $\chi^2[\hat{\varepsilon}(\mathbf{r})] = \|P[\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_i, t)] - p(\mathbf{r}_i, t)\|^2$ — невязка решения. Такой подход более перспективен, нежели корреляционный метод (2). Достаточно отметить, что А.Н. Тихоновым [16] был разработан метод регуляризации, основанный на применении так называемых стабилизирующих функционалов [17]. Методы регуляризации позволяют получать изображения с высоким отношением сигнал/шум, с разрешающей способностью больше критерия Рэлея и эффективно обрабатывать эхо-сигналы, измеренные с нарушением теоремы Котельникова.

Использование в качестве пробного дефекта точечного рассеивателя делает расчет по формулам (2) или (7) оптимальным только для случая отражателей, размеры которых много меньше длины волны. И вот тут преимущества расчетов по формуле (7) перед корреляционным методом (2) становятся принципиальными. Пусть на первом этапе по формуле (2) восстановлено изображение неизвестных отражателей. Его анализ позволит сделать предположение о наличии нескольких отражателей M заданного типа. В зависимости от типа дефекта при расчетах дифрагированных лучей нужно использовать различные модели дифракции. Понятно, что если сделано предположение, что отражатель трещина, то нет необходимости рассчитывать волну обегания. Эти соображения формально позволяют уточнить расчет прямой задачи по формуле (1) следующим образом:

$$\hat{p}(\mathbf{r}_i, t) = \sum_{m=1}^M P[\{\hat{s}_m\}, q(\mathbf{r}_i, t); d], \quad (8)$$

где $q(\mathbf{r}_i, t)$ — падающее поле, d — тип дифракции на отражателе, $\{\hat{s}_m\}$ — список с оценкой параметров, характеризующих отражатель номером m из их общего числа M . Так если сделано предположение,

что отражатель с номером m — это отверстие бокового сверления, то список будет состоять, как минимум, из диаметра и координат центра отверстия. При более точном расчете рассеянного поля в список могут быть включены и акустические параметры среды заполнения отверстия. Если предполагается, что отражатель с номером m — это усталостная трещина, то в списке нужно указать координаты центра, высоту трещины и ее наклон β_y в плоскости xz . Отметим, что формула (8) не описывает многократное рассеивание эхо-сигналов на дефектах, хотя принципиально позволяет учесть этот эффект.

Оценку рассеянного поля по формуле (8) можно применять при использовании метода наименьших квадратов (7) с той только разницей, что оптимизация происходит не по амплитудам потенциала рассеивания точечных отражателей, а по списку списков параметров $\{\hat{s}_m\}$:

$$\hat{\varepsilon}_\chi(\mathbf{r}) = \arg \min_{\{\hat{s}_m\}} \{\chi^2(\{\hat{s}_m\})\}, \quad (9)$$

где $\chi^2(\{\hat{s}_m\}) = \|P[\{\hat{s}_m\}, q(\mathbf{r}_i, t)] - p(\mathbf{r}_i, t)\|^2$ — невязка между измеренным полем и его оценкой. То есть в отличие от формулы (7) информация о несплошностях формируется не в виде изображения, а в виде списка параметров отражателей.

Можно отказаться от ГТД для расчета рассеянного поля на отражателях $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r})$ и воспользоваться методом конечных элементов [18] для векторного варианта волнового уравнения. Такой подход позволяет учесть все волновые эффекты, связанные и с многократным рассеянием между дефектами, и эффекты трансформации типов волн как на дефектах, так и при отражении от границ объекта контроля. Очень важно и то обстоятельство, что при данном подходе восстановленной информацией будет распределение в пространстве скорости и плотности материала отражателей. Но в настоящий момент это чрезвычайно ресурсоемкая задача, требующая минимизации функции $N_{i,x} N_{i,z}$ переменных, равному количеству точек ОВИ. Ее решение возможно только на суперкомпьютере. Но если учесть, что стоящий сегодня на столе персональный компьютер обладает производительностью суперкомпьютера 14-ти летней давности, то такой подход может быть реализован на персональном компьютере недалекого будущего или с использованием технологии облачных вычислений [19].

Модельные эксперименты

Для демонстрации эффективности учета дифрагированных волн был проведен ряд модельных экспериментов.

Восстановление изображения моделей дефектов проводилось с помощью когерентного ультразвукового дефектоскопа серии «АВГУР АРТ», разработанного и изготовляемого в НПЦ «ЭХО+».

Изображение усталостной трещины в образце трубопровода Ду800

Образец был изготовлен из фрагмента трубопровода Ду800 с наплавкой толщиной 4 мм. В образце была накачена продольная усталостная трещина, имеющая максимальную высоту 8 мм. Измерения эхо-сигналов в режиме тройного сканирования проводились по TOFD-подобной схеме (см. предыдущую статью в этом номере журнала) дефектоскопом «Х-32» с помощью двух антенных решеток PE-5M32E0.8P (апертура $32 \times 0,8$ мм, частота 5 МГц), размещенных на рексолитовых призмах T1-35WOR-1 с углом наклона $\beta_y = 35^\circ$.

На рис. 1 слева представлено изображение, полученное в режиме тройного сканирования по схеме $T(L) - T(L)$ по формуле (5), а справа — изображение, полученное в режиме двойного сканирования (3). На изображения линиями красного цвета нанесены контуры трещины и границы образца. Для повыше-

ния амплитуды малых бликов контрастность левого изображения увеличена до 12 дБ. Видно, что работа в режиме тройного сканирования обеспечивает втрое большую фронтальную разрешающую способность, что позволяет обнаружить на рисунке области тени как на изображении дна, так и на изображении границы наплавки. Наличие области тени позволяет утверждать, что обнаруженный отражатель — это вертикально ориентированная трещина, высоту которой можно определить по бликам ее краев. Анализ фазы бликов краев трещины показывает, что они отличаются на 180° , что является общепринятым признаком обнаружения трещины.

На рис. 2 слева представлено изображение, полученное в режиме тройного сканирования по акустической схеме $T(S) - T(L)$, а справа — в режиме двойного сканирования. Для получения изображения по новой акустической схеме использовались те же эхо-сигналы, по которым было восстановлено изображение на рис. 1. Видно, что амплитуды бликов краев трещины выровнялись, и блики имеют более высокое разрешение, нежели в случае акустической схемы $T(L) - T(L)$. А вот граница наплавки

стала едва-едва заметна. Изображение, полученное в режиме двойного сканирования по акустической схеме $T(S) - T(L)$, позволяет более точно определить размеры трещины по сравнению с изображением по схеме $T(L) - T(L)$.

Изображения отверстия бокового сверления в образце с неровным дном

Для имитации модели объемного дефекта в стальном образце на глубине 12 мм было сделано отверстие бокового сверления диаметром 2 мм. Образец толщиной 18 мм имел неровное дно для имитации расточки в трубопроводе типа Ду300. Эхо-сигналы измерялись в режиме тройного сканирования прибором M2M [6] с помощью антенной решетки PE-5M32E0.8P, размещенной на рексолитовой призме T1-35WOR-1.

На рис. 3 слева показано изображение, восстановленное методом C-SAFT по одной акустической схеме $T(S) - T(S)$, а справа — изображение, полученное суммированием модулей всех парциальных изображений по схемам $T(S) - T(S)$, $T(S) - T(SS)$, $TB(SS) - TB(SS)$, $T(S) - TBT(SSS)$, $TB(SS) - TBT(SSS)$ и $TBT(SSS) - TBT(SSS)$. Линиями красно-

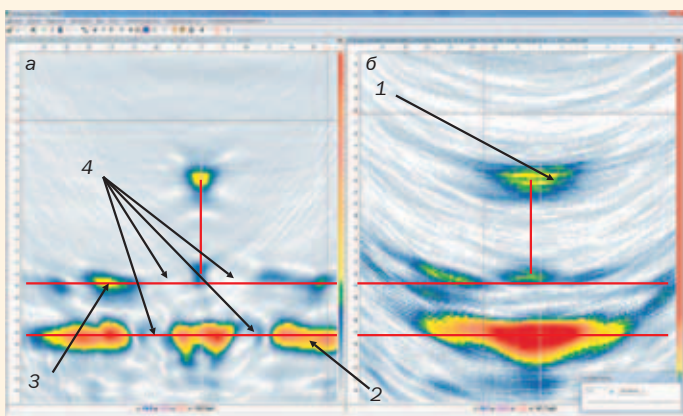


Рис. 1. Изображения В-типа усталостной трещины, полученные в режимах тройного (а) и двойного сканирования (б) по акустической схеме $T(L) - T(L)$: 1 — верхний край трещины; 2 — дно; 3 — граница наплавки; 4 — зона тени

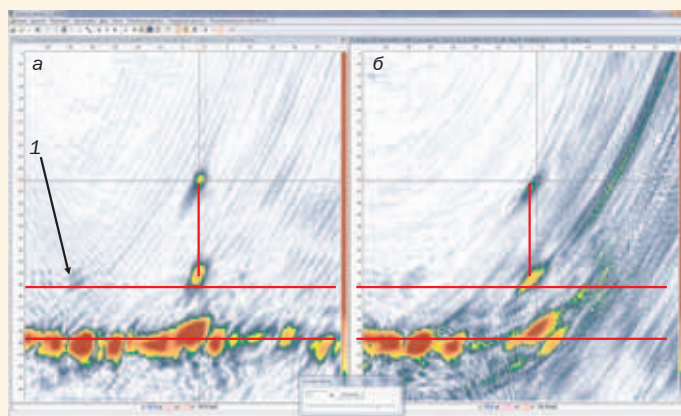


Рис. 2. Изображения В-типа усталостной трещины, полученные в режиме тройного сканирования (а) и в режиме двойного сканирования (б) по акустической схеме $T(S) - T(L)$: 1 — граница наплавки

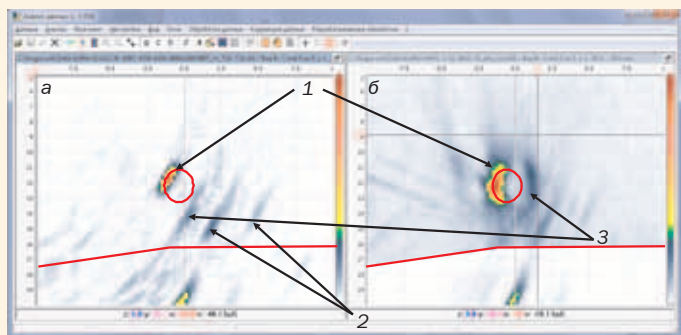


Рис. 3. Изображения В-типа отверстия бокового сверления, восстановленные по акустической схеме $T(S) - T(S)$ (а) и по шести акустическим схемам для поперечной волны (б): 1 — блик границы отверстия; 2 — блик от волны огибания; 3 — ложные блики

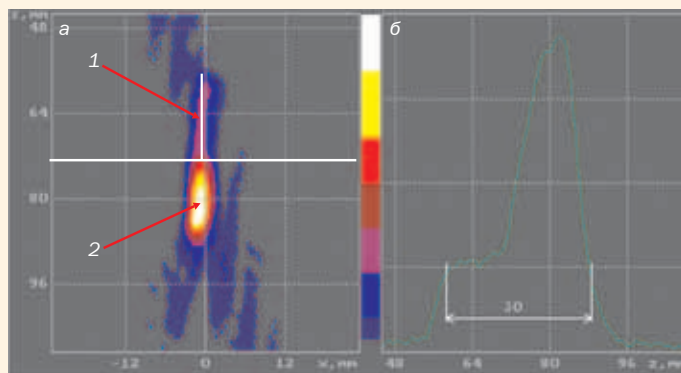


Рис. 4. Изображение В-типа придонной трещины (а) и его вертикальный срез (б): 1 — $TB(LL) - T(S)$; 2 — $T(L) - TB(SS)$

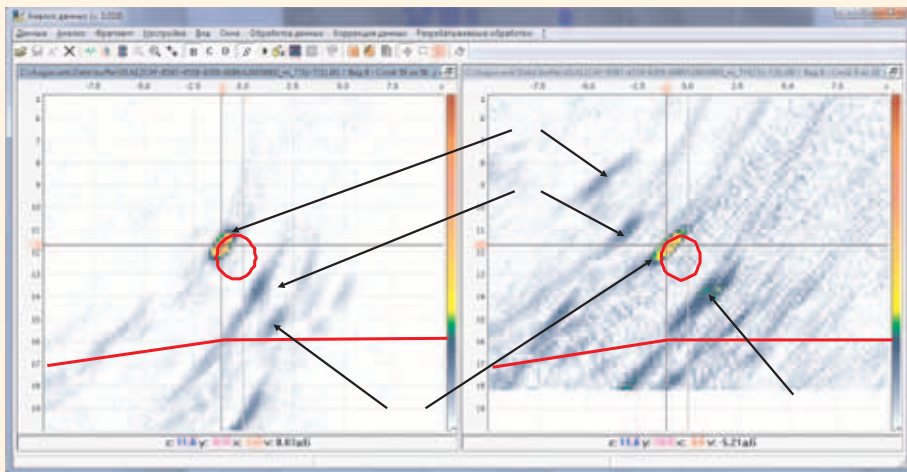


Рис. 5. Изображения B-типа отверстия бокового сверления, восстановленные по акустическим схемам $T(S) - T(S)$ (а) и $TT(LS) - T(S)$ (б): 1 — блик $T(S) - T(S)$; 2 — блик обегания $T(S) - T(S)$; 3 — блик обегания $TT(LS) - T(S)$; 4 — блик $TT(LS) - T(S)$

го цвета нанесены контуры отверстия и границы образца. По изображению, восстановленному по одной акустической схеме $T(S) - T(S)$, практически ничего нельзя сказать о типе обнаруженного отражателя — виден только блик, соответствующий части границы, блик, сформированный импульсом обегания-соскальзывания, и ложные блики сформированные, скорее всего, импульсами, отраженными от границ образца. Не имея априорной информации о типе отражателя, определить тип дефекта весьма не просто, так как достаточно сложно сказать: где ложный блик, а где блик отражателя, и как связаны между собой блики отражателей. Но по изображению, восстановленному по алгоритму (5) по эхо-сигналам, измеренным в режиме тройного сканирования, уже можно различить практически половину границы отверстия. Импульсы обегания сформировали блик, повторяющий

форму границы, амплитудой около 30% от амплитуды основного блика. Наличие этих двух бликов повышает надежность распознавания типа обнаруженного отражателя.

Изображение модели трещины, восстановленное по дельта-методу

На рис. 4 приведены результаты визуализации модели вертикальной придонной трещины в образце из дюралюминия. Моделью трещины служила вертикальная щель высотой 15мм, раскрытием около 50мкм, выполненная электроэрозионным способом. Для излучения поля использовался прямой фокусирующий преобразователь, расположенный над трещиной, а для приема — наклонный преобразователь с углом ввода ультразвука в дюралюминий 50°. Изображения восстанавливались методом ПСП [19] для раздельной схемы регистрации по голограммам в частотном

диапазоне от 1 до 4МГц [20]. Линиями белого цвета нанесены контуры трещины и границы образца. Действительное изображение трещины, соответствующее схеме $TB(LL) - T(S)$, по амплитуде заметно меньше зеркального изображения, соответствующего волне $T(L) - TB(SS)$. Это связано с тем, что облучающая продольная волна после отражения от дна имеет меньшую амплитуду, так как на прямом пути часть ее энергии была израсходована на генерацию боковой волны.

Изображения модели трещины по акустической схеме с учетом головной и боковой волн

Незначительная модификация расчетов времен задержек для алгоритма C-SAFT (3) позволяет восстанавливать изображения по акустическим схемам $TT(LS)$ (см. предыдущую статью в этом номере журнала). На рис. 5 слева показано изображение, восстановленное методом C-SAFT для одного положения антенной решетки по акустической схеме $T(S) - T(S)$, а справа — по акустической схеме $TT(LS) - T(S)$. Для восстановления изображений использовались эхо-сигналы, по которым были получены изображения для отверстия бокового сверления в образце с неровным дном. Линиями красного цвета на рисунок нанесены контуры отверстия и границы образца. Анализ этих двух изображений позволяет выделить только один блик, который отмечен крестообразным маркером и который соответствует границе отверстия бокового сверления. Таким образом, дополнительное изображение, полученное по акустической схеме $TT(LS) - T(S)$, позволяет идентифицировать ложные блики и исключить их из анализа.

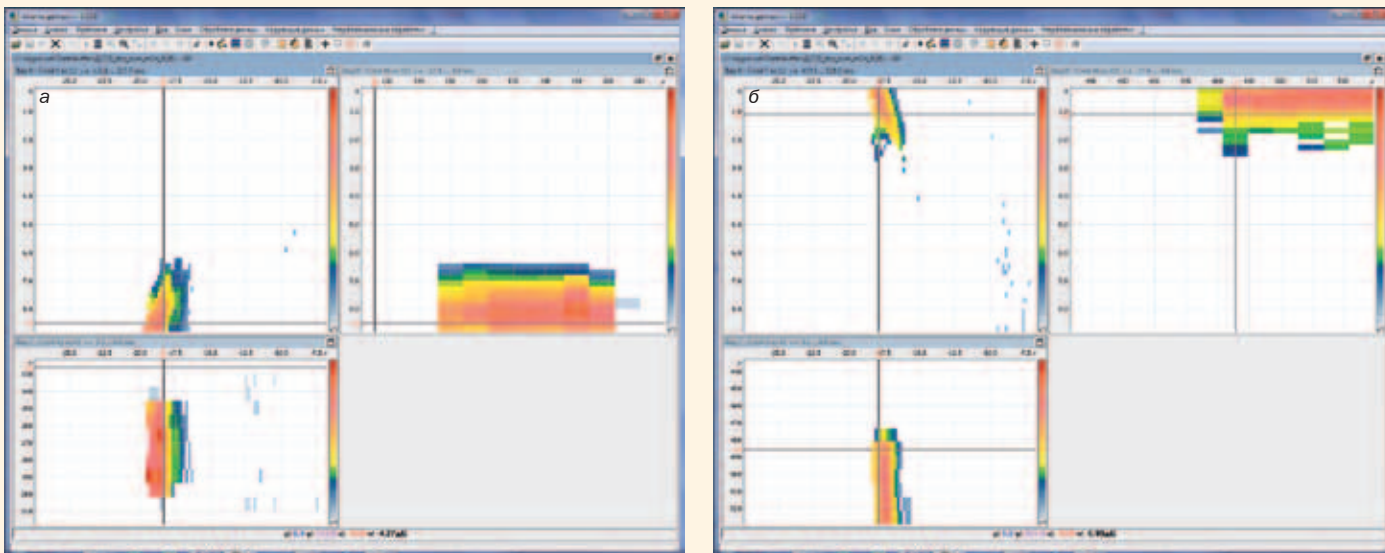


Рис. 6. Изображения B-, C- и D-типа модели придонной (а) и приповерхностной (б) трещин, полученные логическим сложением по 26 акустическим схемам ($N_s = 9$)

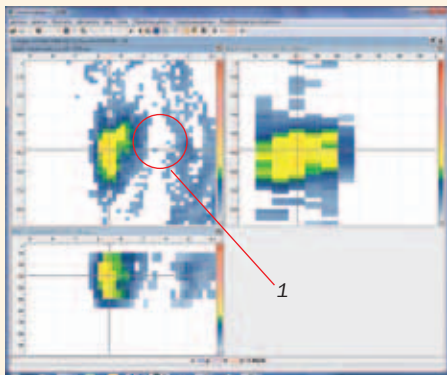


Рис. 7. Изображения В-, С- и D-типа отверстия бокового сверления, полученные логическим сложением по 26 акустическим схемам ($N_1 = 9$); 1 – ложные блики

Изображения с использованием акустической схемы TBB(SLS) получить достаточно сложно, так как у данного образца неровное дно.

Изображения моделей дефектов в образце трубопровода Ду720 с учетом многократных отражений от границ

Образец представлял собой фрагмент трубы диаметром 720 мм с толщиной стенки 9 мм и с продольным сварным соединением, имеющим на внешней и внутренней поверхностях валики усиления. В образце были сделаны искусственные дефекты: отверстие бокового сверления диаметром 4 мм на глубине 5 мм и пропилы, расположенные у дна и у поверхности. Пропилы имели длину около 55 мм и высоту около 2 мм. Передняя грань призмы находилась на расстоянии 25 мм от центра валика усиления. Как упоминалось, для эффективного сложения парциальных изображений нужно учитывать радиус окружности образца. По рассмотренному ранее принципу были определены независимые и значащие акустические схемы для случая пяти отражений. Таких схем оказалось только 26.

На рис. 6а показаны изображения В-, С- и D-типа, восстановленные методом M-S-SAFT (4) в области залегания модели придонной трещины, после логического сложения всех 26 парциальных изображений ($N_1 = 9$). Изображение практически не имеет ложных бликов и позволяет сделать вывод, что обнаружена трещина высотой около 2 мм длиной 48 мм, «растущая» от дна образца.

На аналогичных изображениях на рис. 6б в области залегания модели приповерхностной трещины отсутствуют ложные блики, и можно утверждать, что обнаружена трещина высотой около 2 мм длиной 48 мм, «растущая» от поверхности образца.

На рис. 7 показаны изображения В-, С- и D-типа в области залегания отвер-

стия бокового сверления после логического сложения всех 26 парциальных изображений ($N_1 = 9$). На изображении В-типа линиями красного цвета нанесен контур отверстия, и по восстановленным бликам угадывается фрагмент границы отверстия. Однако амплитуда ложных бликов, сформированных волнами обегания-соскальзывания, заметно выше, чем на изображениях моделей трещин.

Таким образом, приведенные изображения отражателей, восстановленные методом TS-M – C-SAFT с учетом изменения фазы коэффициента отражения от границ образца, позволяют достаточно уверенно определять тип дефекта, его местонахождение и измерять их размеры.

Выводы

Материалы, изложенные в статье, позволяют сделать следующие выводы:

- многообразии схем контроля и анализа основанного на методах, использующих дифрагированные волны, позволяют решать многие задачи дефектоскопии и дефектометрии;
- применение антенных решеток для излучения и регистрации ультразвуковых импульсов позволяет регистрировать эхо-сигналы множества дифрагированных волн;
- модельные эксперименты показали, что использование дифрагированных при восстановлении изображений отражателей позволяет повысить достоверность определения типа отражателя, его размеров и глубины залегания;
- технология с использованием цифровой фокусировки антенных решеток более перспективна для получения высококачественных изображений отражателей, нежели технология с использованием фазированных антенных решеток;
- дальнейшим многообещающим развитием методов восстановления изображений является методы, основанные на минимизации невязки.

Литература

1. Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. – 304 с.
2. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978. – 248 с.
3. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль/Справочник // Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. и др. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов/Под ред. А.Х. Вopilкина. – М: Машиностроение, 2008. – 368 с.

5. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. – Waltham (США): Olympus NDT, 2007. (доступно в Интернете: <http://www.olympus-ims.com/en/books>).
6. <http://www.m2m-ndt.com>
7. Конорев А.А., Беляев А.В., Семеренко А.В. Диагностическая система MULTISCAN-SM на службе ООО «Газпром». – Территория нефтегаз. 2009. № 9. С. 40 – 41.
8. ISONIC – серия портативных дефектоскопов общего назначения. – В кн.: Средства акустического контроля: технический справочник/Под ред. М.Я. Грудского. – СПб.: Свен, 2008, с. 117 – 120.
9. Базулин Е.Г., Коколев С.А., Голубев А.С. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. – Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 18 – 32.
10. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А. и др. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. – Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29 – 41.
11. A1550 IntroVisor – универсальный ультразвуковой томограф. – В кн.: Средства акустического контроля: технический справочник/Под ред. М.Я. Грудского. – СПб.: Свен, 2008, с. 68 – 69.
12. 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 (51). С. 64 – 70.
13. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки. – Дефектоскопия. 2012 (в печати).
14. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT, с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля. – Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 39 – 56.
15. Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов с учетом многократного отражения ультразвуковых импульсов от плоскопараллельных границ объектов контроля. – Дефектоскопия. 2007. № 7. С. 48 – 70.
16. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. 1986. – 288 с.
17. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии. – Дефектоскопия. 2012 (в печати).
18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике/Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
19. Риз Д. Облачные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 288 с.
20. Базулин Е.Г. Когерентное восстановление изображений дефектов при регистрации эхосигналов в раздельном режиме. – Дефектоскопия. 2005. № 11. С. 80 – 96.
21. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование трансформированных волн для получения изображения вертикальных трещин по многочастотным акустическим голограммам. – Дефектоскопия. 1993. № 6. С. 3 – 9.

Статья получена 27 июля 2012 г.