



Исследование возможностей моделирования для улучшения выявления плоскостных дефектов, расположенных под усадочными раковинами

Представлены физические основы методов, реализующих технологию акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб с использованием крутильных волн, основанную на методе многократных отражений, и результаты промышленного использования акустического дефектоскопа АДНКТ при сервисном обслуживании насосно-компрессорных труб.

Submitted 02.02.15

Accepted 05.03.15

Сотрудники EXTENDE S. A., Масси (Massy), Франция

БАННУФ Суад



Руководитель группы исследований и разработок. С 2009 по 2012 гг. – сотрудник компании «CEA Saclay». В 2013 г. защитила кандидатскую степень

по акустической физике в Университете «Париж VII – Дени Дидро».

ЛОНЕ Себастьян



Технический директор. Один из основателей и сотрудник компании «EXTENDE», эксклюзивного дистрибьютора ПО CIVA в мире. Научные интересы – автоматизация процедур НК.

ФУШЕ Фабрис



Коммерческий директор. Занимается моделированием и изучением процессов НК различными методами (УЗ и ВТ). Член рабочей группы «Моделирование процессов НК вихретоковым методом» французского общества НК COFREND.

Сотрудники EDF (Главный технический отдел), Гренобль, Франция

ДЕЛЬМОНТЕ Жером



Руководитель испытаний и внедрения новых методик НК в процессы строительства и технической эксплуатации гидро- и тепловых электростанций. Опыт работы в НК – 19 лет.

ШАППА Летиция



Область деятельности – инновационные процессы НК (контроль сварных швов методом АУЗК TOFD, тестирование ЭМАП, автоматизированный контроль труб бойлеров).

S. Bannouf*, S. Lonne*, F. Foucher*, J. Delemontez**, L. Chappaz**

Simulation Study to Improve the Detection of Planar Defects Located Under Shrinkage Cavities

This paper describes the study carried out by EXTENDE and the General Technical Division of EDF on the detection of defects located in a cast steel component including shrinkage cavities. Such casting defects appear within the material during solidification. Experimental measurements and simulations performed with CIVA showed that the presence of such porosities, especially when positioned at mid-thickness of the component, can mask planar type defects located at the bottom of the part and therefore prevent their potential detection.

According to the position of the notch, inspection with OL45° single element probe may lead to poor detection. This happens when the ultrasonic path encounters cavities that hide the defect. The porosities mask the flaw and deflect the acoustic beam which results in a bad positioning of the echo and poor amplitude.

Contrary to the conventional single element inspection, a phased-array probe used in echographic mode allows the detection of the notch for all positions provided that signal to noise ratio is sufficient. The results highlight the importance of the inspection angle and the versatility of phased-array probes that allow inspection with several angles at the same time contrary to conventional inspection restricted to a single angle by probe. However, although notch detection may be ensured with phased-array probes, it is mainly restricted to the corner echo identification because the diffraction is too weak to be measured. In the presence of several porosities and structural noise, it may be difficult to determine the origin of the echo that is supposed to be from the target flaw. Therefore, the Total Focusing Method has been evaluated on its ability to improve flaw identification. Thus, the LL direct mode reconstruction allows obtaining images very similar to echographic. As for the corner echo reconstruction mode, it provides images where the notch is reconstructed along its entire length. This innovating imaging technique allows identifying unambiguously the presence of the flaw despite the shrinkage cavities network located on the ultrasonic waves path.

Keywords: UT inspection, cast steels, shrinkage cavities, simulation, phased-array, total focusing method (TFM)

Введение

На гидравлических и тепловых промышленных установках предприятия EDF имеется много ферритных деталей из литой стали, подвергаемых в процессе эксплуатации знакопеременным гидравлическим нагрузкам, циклическому термическому воздействию. Как следствие в них возникают коррозионные повреждения и трещины термической усталости (рис. 1). Эти детали часто

содержат внутренние поры типа усадочных раковин (типичные технологические дефекты, возникающих в процессе затвердевания литых стальных деталей). Ультразвуковой контроль (УЗК) со стороны внутренней поверхности детали позволяет достаточно надежно выявлять эти дефекты. Считается, что такие дефекты не растут в процессе эксплуатации и неопасны, если они не выходят на поверхность. Однако такие поры

* EXTENDE S.A. Le Bergson, Massy, France

** EDF-Division Technique Générale, Grenoble, France

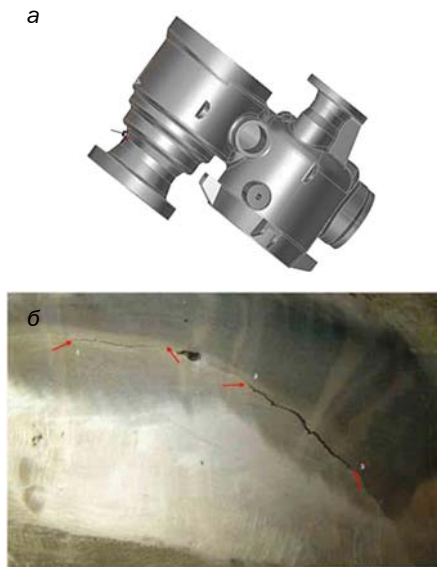


Рис. 1. Литая деталь (а) и трещина на внутренней поверхности (б)

часто присутствуют в виде скоплений и могут маскировать опасные плоскостные дефекты, расположенные ниже, и, следовательно, уменьшать вероятность их обнаружения. Поэтому Главный технический отдел компании EDF изучило целесообразность УЗК, выполняемого с наружной стороны, для поиска плоскостных дефектов, выходящих на внутреннюю поверхность и расположенных под областью с порами. Компания EXTENDE путем моделирования оценила целесообразность проведения такого контроля. Были рассмотрены варианты контроля одноэлементным датчиком и использования ФАР-технологии (фазированных антенных решеток). Для обработки результатов использовался TFM-метод (Total focusing method, метод общей фокусировки). В статье изложены результаты, полученные с помощью программного комплекса для моделирования CIVA.

Модели объекта контроля и выявляемых дефектов

Образец

Для упрощения в качестве образца была взята часть цилиндрического кольца длиной 285 мм по окружной координате (наружный/внутренний радиусы 1470/1400 мм) высотой 100 мм, соответственно толщина стенки составляла 70 мм. Материал образца — изотропная ферритная сталь, шумами и затуханием в материале пренебрегаем, плотность 7,8 г/см³, скорость распространения продольных/поперечных волн 5900/3230 м/с. Поскольку основной целью работы было исследование

возможности выявления с помощью УЗК моделей дефектов в виде паза, расположенного под скоплением пор, упрощения геометрии и материала образца являются оправданными.

Дефекты

Рассматриваемый дефект — паз, выходящий на внутреннюю поверхность, размерами 40×10 мм (L×h).

Образец был проконтролирован в ручном режиме с использованием линейного ФАР-преобразователя на 2 МГц, на рис. 2 представлено сечение образца с выявленным скоплением пор. Полученное расположение дефектов — семь пор — было взято в качестве основы для моделирования. Условные размеры пор были определены оконтуриванием по уровню амплитуды – 6дБ. Контуры были расширены на 20 мм в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Допускается, что поры неизменны в этой плоскости. Для целей моделирования в нижнюю часть образца была добавлена восьмая пора с целью изучения взаимного влияния между дефектами литья, потенциально присутствующими вблизи внутренней стенки, и искомым дефектом.

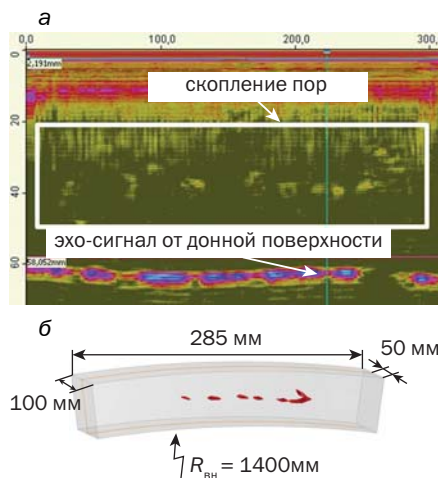


Рис. 2. В-скан для сечения с выявленным скоплением усадочных пор в образце (а) и схематичное изображение образца и выявленных дефектов (б)

Для изучения различных вариантов (экранирование несколькими порами, затенение одной, двумя или тремя порами) паз устанавливается в четырех положениях вдоль образующей длиной 285 мм относительно скопления усадочных пор (рис.3).

Оценка эффективности контроля одноэлементным ПЭП

УЗК пазов, выходящих на донную поверхность, обычным одноэлементным

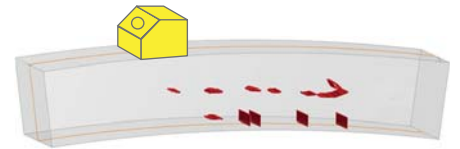


Рис. 3. Расположение модельных дефектов

ПЭП продольных волн LW45° с частотой 2 МГц и Ø 24 мм был моделирован с использованием программы CIVA. Калибровка амплитуды была выполнена по боковому сверлению Ø 2 мм, расположенному в 70 мм от поверхности.

На рис. 4 и 5 показаны моделированные В-сканы для положений паза 1 и 2 относительно скопления пор. Для каждого положения паза В-скан сравнивается с тем, который смоделирован в отсутствие паза для того, чтобы быть уверенным, что эхо-сигнал на В-скане получен от паза, а не от поры.

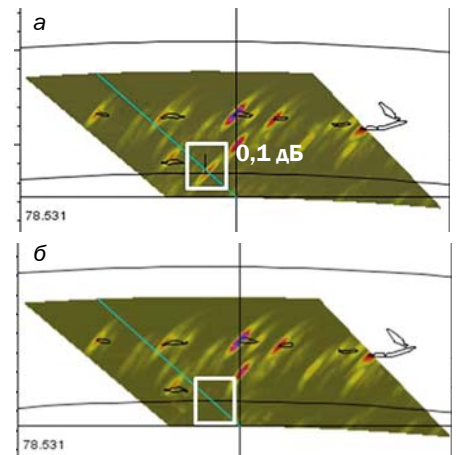


Рис. 4. В-скан при наличии (а) и в отсутствии (б) паза в положении 1 для ПЭП LW45°

На рис. 4 представлены результаты, когда дефект находится в положении 1. Сравнение В-сканов, полученных с пазом и без паза, позволяет подтвердить, что паз хорошо обнаруживается по эхо-сигналу от уголкового отражателя с амплитудой 0,1 дБ относительно отверстия бокового сверления.

Несмотря на наличие скопления усадочных пор, нет проблемы в обнаружении паза в положении 1, однако проблема имеется, когда паз находится в положении 2.

На рис. 5 показан смоделированный В-скан с пазом и без паза для положения 2. Эхо-сигнал от угла виден не совсем там, где он должен находиться. К тому же, он очень низкой амплитуды (-14 дБ). Слабое выявление и некорректное позиционирование эхо-сигнала от угла возникают из-за наличия усадочных пор, которые экранируют паз и отклоняют луч.

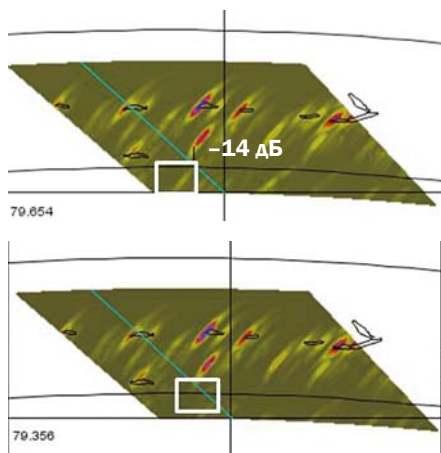


Рис. 5. В-скан при наличии (а) и в отсутствии (б) пазы в положении 2 для ПЭП LW45°

Результаты моделирования показывают, что контроль с использованием одноэлементного датчика LW45° не может обеспечить выявление пазы для всех положений относительно скопления пор. Поры, расположенные в середине образца, могут экранировать пазы, что снижает и/или делает невозможным их обнаружение.

Оценка возможности применения ФАР-технологии

Моделирование контроля одноэлементным ПЭП LW45° показало, что невозможно обеспечить выявление пазы для всех его положений относительно скопления пор. Поэтому при тех же условиях была применена ФАР-технология, чтобы оценить её преимущества. При моделировании использовался контактный преобразователь на 2,25 МГц (48 элементов, шаг 0,8 мм), зафиксированный на призме LW45° из оргстекла. Амплитуда калибровалась по эхо-сигналу от отверстия бокового сверления Ø2 мм, расположенного на той же глубине, что и паз, и выявляемого с заданием фокального закона задержек LW45° и с фокусировкой на глубину 70 мм. Моделированный контроль представляет собой механическое сканирование с шагом 0,05° (для принятых размеров это составляет 1,24 мм) и секторное сканирование в диапазоне от 0 до 60° с шагом 2° и с фокусировкой на глубину 70 мм.

На рис. 6а и 7а приведены моделированные секторные сканы для положений пазы 1 и 2 соответственно, где эхо-сигнал от углового отражателя правильно распознается. Они сравниваются с результатами моделирования без пазы (рис. 6б и 7б) для того, чтобы облегчить распознавание эхо-сигналов. Как показано на рис. 6, эхо-сигнал от

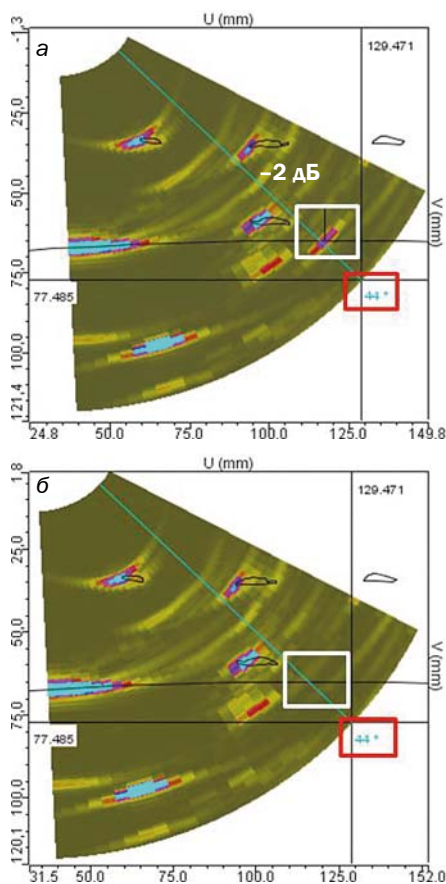


Рис. 6. В-скан при наличии (а) и в отсутствии (б) пазы в положении 1 для ФАР-преобразователя

пазы хорошо определяется при угле ввода LW44°, что близко к углу ввода одноэлементного датчика. Таким образом, в положении пазы 1 применение ФАР-преобразователя не дает преимуществ.

На рис. 7 приведены моделированные секторные В-сканы с пазом и без пазы в положении 2. Их сравнение подтверждает, что эхо-сигнал, обведенный белой рамкой, относится к пазу.

В отличие от контроля одноэлементным датчиком LW45° ФАР-технология позволяет выявить паз в положении 2 в месте его расположения. Однако для положения 2 выявление дефекта происходит при угле ввода 30°.

На рис. 8 показаны В-сканы, полученные при механическом сканировании с применением ФАР-технологии при углах ввода продольной волны 30° и 44° соответственно. Для пазы в положении 1 от контроля одноэлементным датчиком LW45° ФАР-технология позволяет выявить паз в положении 2 в месте его расположения. Однако для положения 2 выявление дефекта происходит при угле ввода 30°.

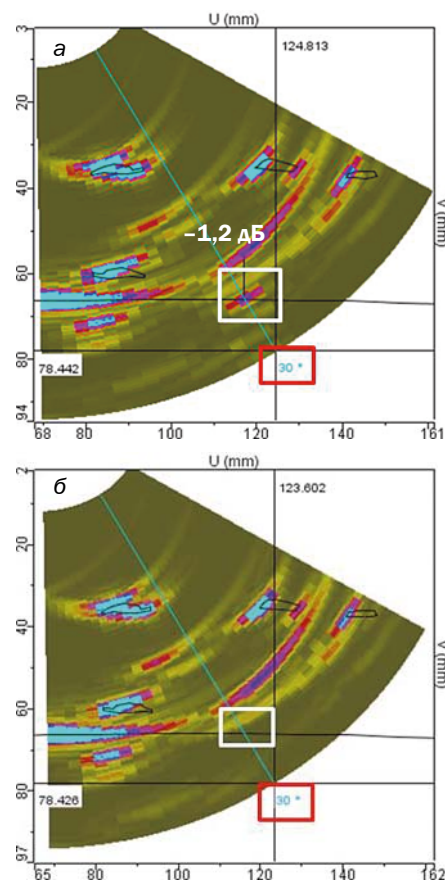


Рис. 7. В-скан при наличии (а) и в отсутствии (б) пазы в положении 2 для ФАР-преобразователя

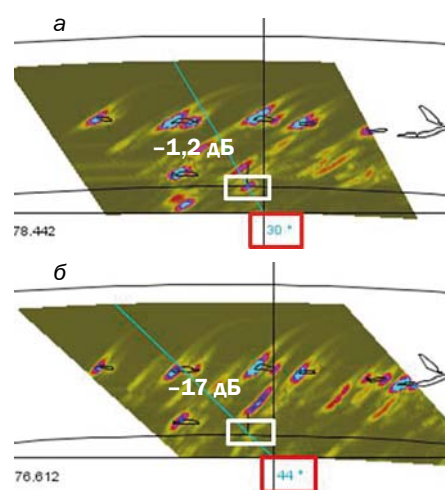


Рис. 8. В-скан для пазы в положении 2 при разных углах ввода продольной волны: а — 30°; б — 44°

ввода LW45°, и успех ФАР-технологии с ее возможностью качания луча.

Результаты, полученные с применением ФАР-технологии, показывают, что можно обнаружить паз вне зависимости от его положения под скоплением пор. Качание луча уменьшает маскирующий эффект, различные углы прозвучивания повышают вероятность обнаружения

паза при разных положениях относительно скопления пор. Кроме того, использование ФАР-технологии повышает разрешение и точность совмещения эхо-сигналов с чертежом образца из-за возможностей фокусировки.

Возможности применения TFM-метода

С применением ФАР-технологии обнаружение паза обеспечивается для всех исследуемых положений по эхо-сигналу от уголкового отражателя, поскольку дифракционный сигнал от вершины трещины слишком слаб. При наличии в образце нескольких пор и структурного шума может быть трудно определить тип дефекта (полость, паз, зернистость и т.д.) по эхо-сигналу. Поэтому была проведена оценка возможностей TFM-метода (Total Focusing Method, метод общей фокусировки) для улучшения выявляемости дефекта.

Метод сбора данных FMC (Full Matrix Capture, метод полноматричного захвата¹) соответствует сбору данных при фиксированном положении антенной решетки и переборе всех элементов полной коммутационной матрицы $\mathbf{K}(t)$. Для решетки из N активных элементов она составляется из $N \times N$ элементов, хранящих импульсы межэлементных откликов $k_{ij}(t)$, где i — номер излучателя; j — номер приемника [1–3].

TFM — алгоритм получения изображений, реализованный в программном комплексе CIVA, предполагает обработку коммутационной матрицы $\mathbf{K}(t)$ и обеспечивает высокое разрешение изображения в исследуемой области [2, 3]. Суть метода — когерентное суммирование всех элементарных сигналов $k_{ij}(t)$ из $\mathbf{K}(t)$ в режиме офлайн с целью фокусировки в каждой точке исследуемой области². Амплитуда в точке M изображения рассчитывается по формуле:

$$A(M) = \sum_{i,j} k_{ij}(T_{ij}^M), \quad (1)$$

где T_{ij}^M — рассчитанное время пролета между точкой M и парой элементов (ij) .

Чтобы оценить преимущества метода получения изображений TFM для обнаружения паза, он был применен для положений, обеспечивающих наилучшие результаты при использовании ФАР. Таким образом, была проверена выявляемость дефекта в зависимости от метода (ФАР или метод TFM).

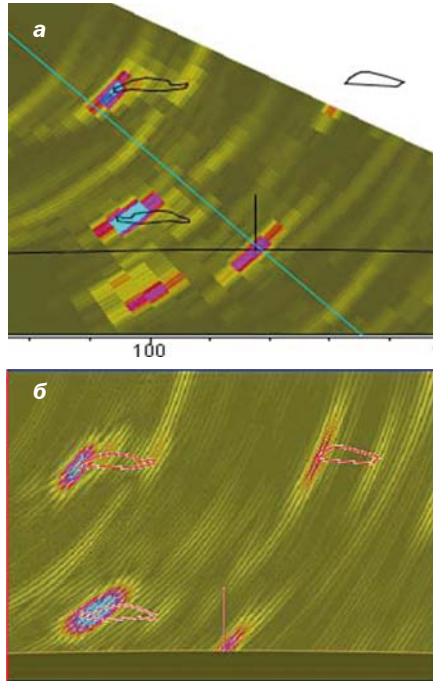


Рис. 9. Изображения паза в положении 1: а — с использованием ФАР; б — по методу TFM, прямой луч по схеме LL

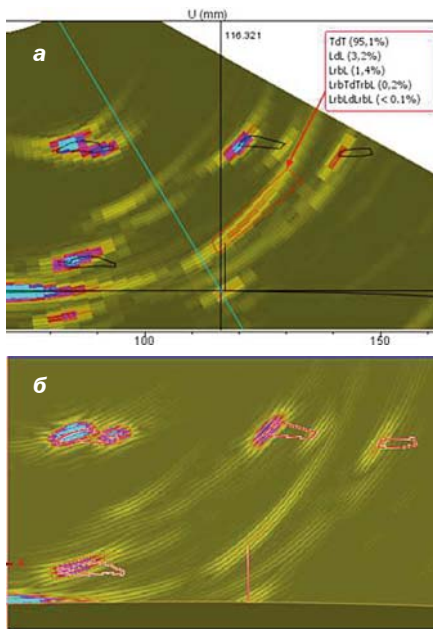


Рис. 10. Изображения паза в положении 2: а — с использованием ФАР; б — по методу TFM, прямой луч по схеме LL

На рис. 9б и 10б показаны моделированные изображения паза, полученные на прямом луче по схеме LL. Режим на прямом луче основан на вычислении теоретического времени пролёта, соответствующего времени распростра-

нения между каждой парой элементов передатчик/приемник (ij) через точку M в исследуемой области. Сравнение изображений, полученных методом TFM, с изображениями, полученными с использованием ФАР (рис. 9а и 10а), показывает, что результаты весьма схожи. Те же эхо-сигналы в тех же координатах находятся на изображениях, полученных методом FMC-TFM и с использованием ФАР.

Кроме обеспечения высокого разрешения на изображении, метод получения изображений TFM имеет еще одно преимущество по сравнению с обычным методом, поскольку позволяет визуализировать дефекты, используя более сложные траектории пути луча, чем «преобразователь/дефект» (на прямом луче). Это возможно благодаря функции восстановления «углового отражателя»³. При восстановлении углового отражателя рассчитанное время пролёта учитывает взаимодействие волны и ее возможные преобразования при отражении от донной поверхности ещё до достижения дефекта [2–4]. Этот режим очень удобен для получения изображений протяженных дефектов, таких, как пазы.

Априори не совсем очевидно, какой ход лучей из 9 возможных вариантов, связанных с трансформацией типа волны при отражении от донной поверхности, следует выбрать для восстановления изображения углового отражателя, чтобы получить изображение паза при наличии скопления пор по всей длине образца. Однако инструмент трассировки (отображения) хода лучей в программе CIVA, хотя и не учитывает направленность излучаемых волн, но помогает найти подходящий режим для получения изображений. На рис. 11 показан путь луча, а на рис. 12 полученные изображения паза для положений 1 и 2. Для положения 1 инструмент трассировки хода лучей показывает, что это будет путь LLL (продольные волны, отмеченные на рисунке зелёным цветом), а для положения 2 более предпочтительным для получения изображения можно считать путь ТТТ (поперечные волны, отмеченные красным цветом).

Траектории луча на рис. 11, построенные с помощью специального инструмента трассировки хода лучей в программе CIVA, используются для получе-

¹ В России данная технология называется технологией двойного сканирования (прим. переводчика).

² В России данная технология называется цифровой фокусировкой антенны — ЦФА (прим. переводчика).

³ В России такой способ визуализации называют иногда «нечетный SAFT» (прим. переводчика).

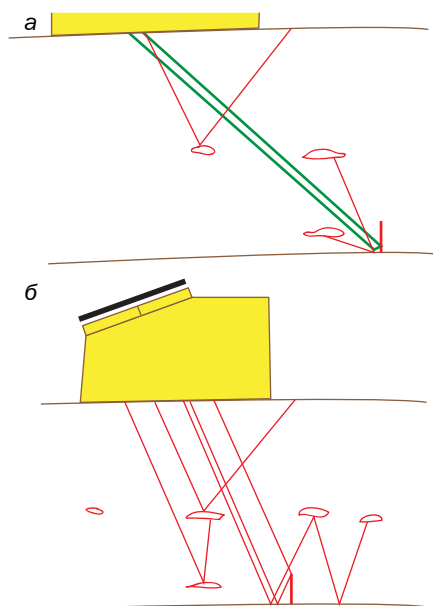


Рис. 11. Путь луча для паза в положении 1 (а) и в положении 2 (б): зеленый цвет — продольные волны; красный цвет — поперечные волны

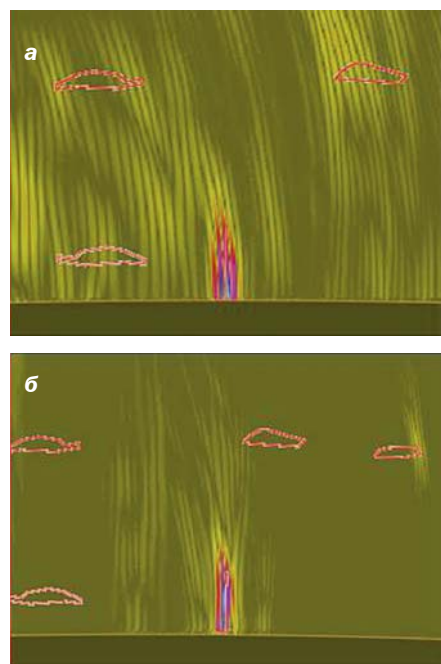


Рис. 12. Изображения паза TFM-методом: а — по схеме LLL для положения 1; б — по схеме ТТТ для положения 2

ния изображения углового отражателя методом TFM. Результаты представлены на рис. 12, в отличие от контроля на прямом луче паз больше не характеризуется двумя дифракционными эхо-сигналами.

Были протестированы режимы, отличные от предложенных инструментом трассировки хода лучей. Был сделан вывод, что получить корректное изображение паза можно только в режимах LLL

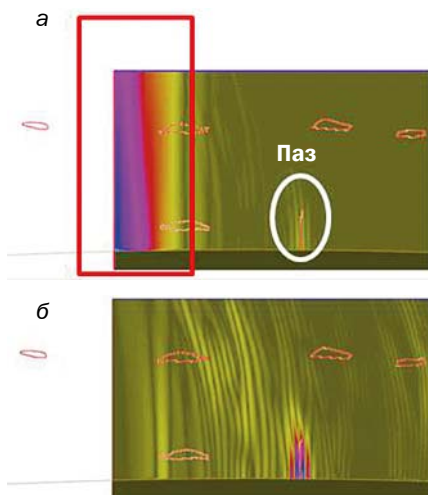


Рис. 13. Получения изображения паза методом TFM по схеме LLL: а — с донным эхо-сигналом, б — без донного эхо-сигнала

и ТТТ. Однако, когда датчик расположен вблизи плоского дефекта, отклик от него в режиме LLL слабее, чем в режиме ТТТ. Это возможно для паза в положении 2, когда он выявляется при угле ввода 30°. В этом положении в режиме LLL непосредственно под призмой на изображении присутствует ложный сигнал большой амплитуды (рис. 13а).

Этот ложный сигнал соответствует восстановленному сигналу от донной поверхности в режиме LLL. Для того чтобы воспроизвести как можно точнее акустические явления, происходящие в эксперименте, был смоделирован донный эхо-сигнал.

Алгоритм TFM рассчитывает амплитуду эхо-сигналов для каждого пикселя области восстановления по времени пролёта луча, соответствующих схеме LLL. Из-за того, что часть области восстановления расположена ниже апертуры преобразователя, алгоритм визуализирует данные, полученные на продольной волне от донной поверхности образца, что создает ложные сигналы на изображении. У донного эхо-сигнала амплитуда больше, чем амплитуда эхо-сигнала от паза. Для того чтобы подтвердить происхождение этого сигнала, было выполнено моделирование без расчета донного сигнала. Изображение, полученное в режиме LLL, показано на рис. 13б. На нем нет ложного сигнала, присутствует только изображение паза, восстановленное по всей его длине и с большей амплитудой. Таким образом, показано, что донный эхо-сигнал вызывает появление артефакта в режиме LLL. Этот сигнал не появляется в режиме ТТТ, поскольку время пролёта луча, рассчитанное ал-

горитмом для получения изображения паза, больше, чем время пролёта от донной поверхности.

Учитывая эти результаты, можно утверждать, что изображения, полученные методом TFM по схеме LL, имеют то же качество, что и полученные по ФАР-технологии. Режим восстановления углового отражателя повышает достоверность обнаружения дефектов путем визуализации поверхности дефекта по всей его высоте. Кроме того, данный режим позволяет фильтровать изображение от эхо-сигналов большой амплитуды, возникших из-за пор, которые присутствуют в ФАР-технологии или при визуализации в режиме по схеме LL. Таким образом, TFM — это метод визуализации, который обеспечивает обнаружение динамическую фокусировку по всей заданной области и обнаружение плоскостных дефектов, выходящих на донную поверхность, несмотря на наличие скопления пор, препятствующего распространению ультразвуковых волн. Кроме того, метод позволяет подтвердить относится ли наблюдаемый эхо-сигнал, полученный в прямом режиме или по ФАР-технологии, к скоплению пор или к искомому пазу.

Этот вывод остается верным при достаточном отношении сигнал/шум. При использовании метода сбора данных FMC излучение только одним элементом за раз снижает количество энергии, излучаемой в образец. Это может не оказывать влияние при низком затухании в материале, но в средах с высоким уровнем шумов, таких как крупнозернистая ферритная литая сталь, может снижаться отношение сигнал/шум, выявляемость и т. д.

Заключение

Компанией EXTENDE и Главным техническим отделом компании EDF проведено исследование по выявлению дефектов, в том числе усадочных пор, расположенных в средах с высоким уровнем шумов, таких как крупнозернистая ферритная литая сталь. Моделирование в программе CIVA показало, что наличие скопления пор может маскировать дефекты плоскостного типа, расположенные в нижней части образца, и, таким образом, потенциально делать их обнаружение невозможным. Был рассмотрен контроль моделированного образца с использованием одноэлементного ПЭП LW45° и ФАР-преобразователя. Показано, возможности ФАР по излучению ультразвуковой волны под различными углами

и её фокусировке помогают уменьшить экранирующий эффект пор. Для надежности результатов моделирования рекомендуется дополнять расчеты моделированием без дефекта, потому что нельзя утверждать, что полученный эхо-сигнал относится к пазу, это возможно только после выделения эхо-сигнала от углового отражателя.

Была проведена оценка метода TFM по его способности предоставлять дополнительные сведения о происхождении искомого эхо-сигнала при использовании режима восстановления углового отражателя. Этот метод позволяет однозначно выявить паз, несмотря на наличие скопления пор, расположенных на пути ультразвуковых волн.

Полученные результаты показывают, что выявление выходящего на донную поверхность паза, расположенного под скоплением пор, возможно. Однако отметим, что структурные шумы не были промоделированы. Таким образом, эти результаты остаются верными при условии достаточного отношения сигнал/шум, особенно для метода TFM, при котором метод FMC ограничивает мощность излученной в образец энергии. В дальнейшем необходимо проверить результаты путём экспериментальных исследований.

Литература/References

1. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive

evaluation. — *NDT&E Internat.*, 2005, v. 38, pp. 701–711.

2. Bannouf S. *Développement et optimisation de méthodes d'imagerie synthétique pour le contrôle non-destructif par ultrasons de composants industriels complexes*. PhD thesis, Université Paris, 2013.

3. Bannouf S., Robert S., Casula O., Prada C. *Evaluation of multi-element methods applied to complex geometries*. — In: AIP Conf. Proc., 2012, v. 1430, p. 833.

4. Fidahoussen A., Calmon P., Lambert M. et al. *Imaging of Defects in Several Complex Configurations by Simulation-helped Processing of Ultrasonic Array Data*. — *Review of Quantitative Non-destructive Evaluation*, 2009. v. 29, pp. 847–854.

Статья получена 2 февраля 2015 г.,
в окончательной редакции — 5 марта