

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МОД НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

© 2021 г. М. Дж. Ранджбар^{1,*}, Сина Содагар¹

¹Нефтяной технологический университет, Абадан, Иран
E-mail: *m.ranjbar@put.ac.ir

Поступила в редакцию 02.05.2021; после доработки 27.06.2021
Принята к публикации 09.07.2021

Для оценки поверхностных и внутренних дефектов в стальной пластине использовался метод сканирования с ультразвуковой фазированной решеткой. Моды ультразвуковых направленных волн от преобразователя с фазированной решеткой были промоделированы с использованием метода конечных элементов. Результаты экспериментов показали, что высокочастотная мода А0 дает приемлемую чувствительность и разрешение для малых диаметров сквозных дефектов и поверхностных дефектов. Секторное сканирование показало лучшее разрешение по оси в сравнении пространственным разрешением.

Ключевые слова: ультразвук, направленные волны, высокая частота, фазированная решетка.

DOI: 10.31857/S0130308221090037

1. ВВЕДЕНИЕ

Пластинчатые элементы из-за широкого применения в качестве компонентов промышленного применения нуждаются в надежных методах неразрушающего контроля (НК) для своевременного обнаружения дефектов. Трещины и коррозионные повреждения — это такие распространённые дефекты, контроль и обнаружение которых имеет решающее значение, особенно когда эти дефекты являются внутренними. Некоторые методы НК были изучены на предмет возможности сканирования и обнаружения локальной коррозии с точки зрения изменений толщины стенок и точечной коррозии с точки зрения кольцевых неоднородностей. Среди них ультразвуковые методы обеспечивают хорошее разрешение и обнаружение уменьшения толщины до 10 % с быстрым откликом [1]. При ультразвуковом контроле происходит передача ультразвуковых волн в образец и прием отражений для анализа предоставляемой информации [2]. Несмотря на широкое использование объемных ультразвуковых волн для контроля уменьшения толщины путем измерения времени прохождения волны, оно ограничено плохим временным разрешением в тонких пластинах и трудоемкостью при контроле на больших расстояниях [3]. В качестве альтернативы, ультразвуковые направленные волны с использованием более низких частот обладают большим диапазоном контроля, а также несут больше информации о различных типах дефектов [4]. В случае контроля коррозии Rose и Barshinger [5] исследовали возможность использования отсечки мод направленных волн в качестве функции для контроля и классификации коррозии. Silva и др. [6] работали над частотно-временным анализом сигналов коррозии в алюминиевой конструкции самолета с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. Sargent [7] представил контроль коррозии сварных швов и зон термического влияния. Jhang и др. [8] использовали сфокусированную направленную волну, генерируемую лазером, для визуализации отверстий. Rathod и Mahapatra [9] предложили концепцию локализации и параметрической идентификации повреждений коррозионного типа с использованием кольцевой антенной решетки из пьезоэлектрических пластинчатых активных датчиков (ППАД).

С другой стороны, интерпретация результатов контроля направленными волнами (одновременного из-за их дисперсионного характера и из-за генерирования нескольких различных мод) требует наличия должной квалификации дефектоскопистов и контроллеров [10]. С появлением преобразователей с фазированной антенной решеткой (ФАР) в качестве новой технологии в области ультразвукового контроля использование ФАР-устройств значительно расширилось. Уникальные возможности формирования лучей дает независимое управление элементами преобразователя [11].

Некоторые исследователи пытались объединить контроль направленными волнами как метод контроля больших расстояния с ФАР-визуализацией как методом локального контроля, чтобы

улучшить эффективность или получить дополнительную информацию, касающуюся выделения особенностей дефектов. Deutch и др. [12] представили новую методику самофокусировки волноводных мод с использованием линейного массива пьезоэлектрических элементов. Sicard и др. [13, 14] использовали алгоритм синтезированной апертурной фокусировки (САФ) в области Фурье (Ф-САФ) для модификации изображения с преобразователей с фазированной антенной решеткой. Prager и др. [15] разработали модель распространения волн и селективного возбуждения мод направленных волн для дефектоскопии трещин разного размера и контроля уменьшения толщины материала.

В этой статье с целью формирования изображения с использованием ФАР (как метода локального контроля) исследуются высокочастотные моды направленных волн. ФАР-преобразователи применяют для сканирования различных поверхностных и внутренних дефектов модами направленных волн. Параметры выбранной волновой моды определяются посредством конечно-элементного анализа распространения волн с фазированной решеткой в стальной пластине. Кроме того, исследуются возможности мод направленных волн для секторных сканирований и в пространственном, и в осевом разрешении с использованием информативных изображений, таких как В- и S-сканов для оценки и интерпретации результатов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Распространение направленных волн в пластинчатых объектах определяется уравнением Рэлея—Лэмба [1]. Рассматривая пластину толщиной $d = 2h$ и свободные от нагрузки граничные условия на краях, уравнение записывается как

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \left[\frac{4pqk^2}{(q^2 - k^2)^2} \right]^{\pm 1}, \quad (1)$$

где k — волновое число в направлении распространения. Порядки (+1) и (-1) определяют симметричные и асимметричные моды, которые обозначаются буквами S и A соответственно на рис. 1. С поперечными и продольными волновыми числами k_t и k_l переменные p и q задаются в виде:

$$p^2 = k_t^2 - k^2 \quad \text{и} \quad q^2 = k_l^2 - k^2. \quad (2)$$

Согласно уравнению (2), многочисленные симметричные и асимметричные волновые моды могут распространяться с заданным произведением частоты и толщины fd . Моды обладают различными фазовыми и групповыми скоростями. Более того, нормальная и плоская компоненты перемещения частицы не совпадают с fd , что само по себе не очевидно из диаграмм [16].

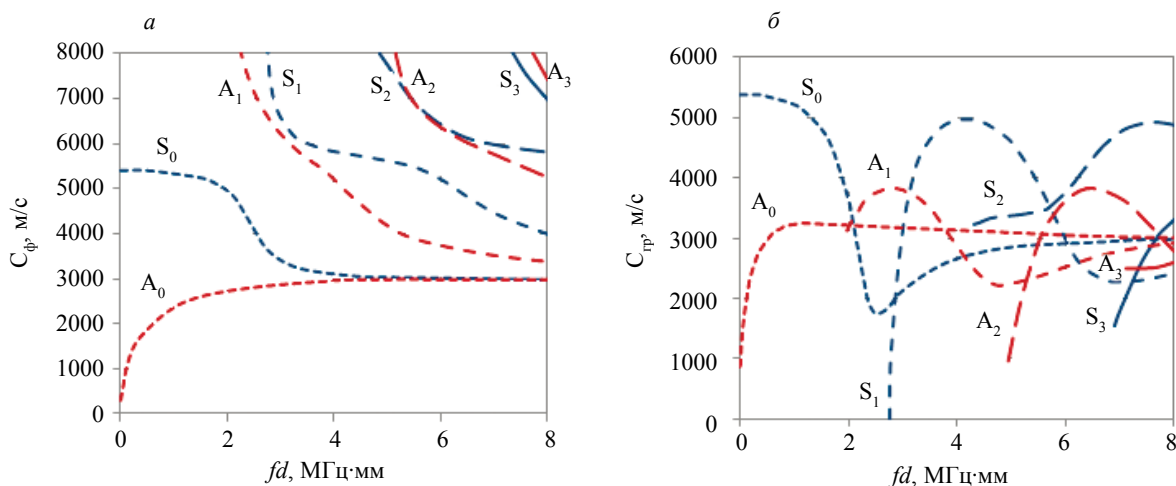


Рис. 1. Фазовые и групповые скорости нескольких направленных волновых мод на стальной пластине: фазовая скорость (а), групповая скорость (б).

Согласно Azar и др. [17], регулирование ультразвукового ФАР-луча достигается за счет временной задержки. Для акустически изотропной и гомогенной среды постоянная задержка, $\Delta\tau$, для регулирования ультразвуковым полем может быть записано как

$$\Delta\tau = \frac{p \cdot \sin \theta_s}{c}, \quad (3)$$

где p — расстояние между двумя смежными элементами решетки; θ_s — угол проходящей волны; c — скорость волны. Задержки при фокусировке для любого количества элементов решетки также рассчитывается по следующему закону распределения задержек:

$$t_n = (F/c) \left\{ \begin{array}{l} \left[1 + \left(\frac{\bar{N}p}{F} \right)^2 + \frac{2\bar{N}p}{F} \sin \theta_s \right]^{1/2} \\ - \left[1 + \left(\frac{(n-\bar{N})p}{F} \right)^2 - \frac{2(n-\bar{N})p}{F} \sin \theta_s \right]^{1/2} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где N — число элементов; F — фокусное расстояние; \bar{N} — число активных элементов; t_n — требуемое время задержки для элемента $n = 0, \dots, N-1$ и $\bar{N} = (N-1)/2$.

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Конечно-элементная (КЭ) модель состоит из однородной пластины со свойствами стали и, в частности, модулем Юнга, равным $E = 209 \text{ ГН/м}^2$, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$; плотностью $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$. Данные величины приводят к продольным и поперечным скоростям волны 5940 и 3230 м/с соответственно. Толщина пластины 0,6 мм и ее общая длина 700 мм.

3.1. Передатчик

Преобразователь в виде фазированной решетки, расположенный на поверхности клина, использовался для управления направлением распространения волны, используя принцип, представленный в уравнении (5). В зависимости от закона распределения задержек ФАР-устройства, угол наклона α управляется электроникой таким образом, чтобы могло быть достигнуто селективное возбуждение волновой моды с фазовой скоростью $c_{ph} = f \cdot \lambda$, где f — частота; λ — длина волны.

Угол наклона ФАР-устройства [15]:

$$\alpha + \varphi_w = \beta = \sin^{-1} \left(\frac{c_w}{c_{ph}} \right). \quad (5)$$

Как можно видеть из рис. 2а, для конкретных сочетаний материалов клина с углом φ_w и пластины угол ввода β может определяться для заданной моды и произведения fd .

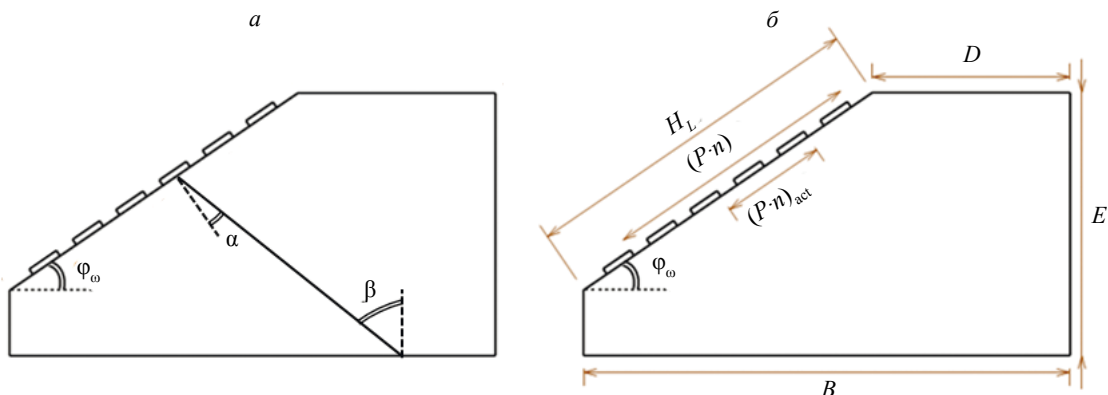


Рис. 2. ФАР-преобразователь и клин из оргстекла: эффективные углы (а); линейные размеры (б).

Размеры элементов фазированной решетки

Параметры клина	Параметры ФАР
$B = 90$ мм	$H_L = 40$ мм
$D = 38$ мм	$(P \cdot n) = (0,6 \text{ мм} \cdot 32)$
$E = 35$ мм	$(P \cdot n)_{\text{act}} = (0,6 \text{ мм} \cdot 32)$

Линейные размеры элементов ФАР и клина из оргстекла, проиллюстрированных на рис. 2б, даны в табл. 1. Модель клина рассматривалась в виде оргстекла (акрил) со свойствами материала: модуль Юнга $E = 9$ ГН/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,39$, плотность $\rho = 1180$ кг/м³. Данные величины приводят к продольным и поперечным скоростям волны 2730 и 1430 м/с соответственно.

3.2. Возбуждение волны

В КЭ-модели для симуляции пьезоэлектрического возбуждения наклонная боковая стенка клина нагружается 4-цикловой оконной функцией давления Хеннинга на центральной частоте 5 МГц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения экспериментов используются ультразвуковое ФАР-устройство M2M Multi2000 с мультиплексированной архитектурой 32×128 каналов и датчик с линейной решеткой с центральной частотой 5 МГц. Общая возможная активная длина преобразователей составляет 38,3 и 76,8 мм соответственно, оба имеют одинаковые размеры элементов $10 \times 0,5$ мм и шаг элементов 0,6 мм, что обеспечивает возможности высокого разрешения. Угловой клин 31° из рексолита используется совместно с ФАР-оборудованием. Управление лучом осуществляется в виде секторных сканирований. Секторное сканирование вычисляет последовательность в законе распределения задержек, что позволяет сканировать по порядку в диапазоне требуемых углов.

Наконец, демонстрируются потенциальные возможности сканирования фазированной антенной решетки с одним и несколькими отражателями. Расстояние между дефектом и датчиком составляет от 20 до 40 мм. Дефекты представляют собой различные поверхности и сквозные отверстия, а также крестообразное повреждение, имитирующее коррозионные язвы и трещины в стальном листе соответственно. На рис. 3 показана экспериментальная установка.

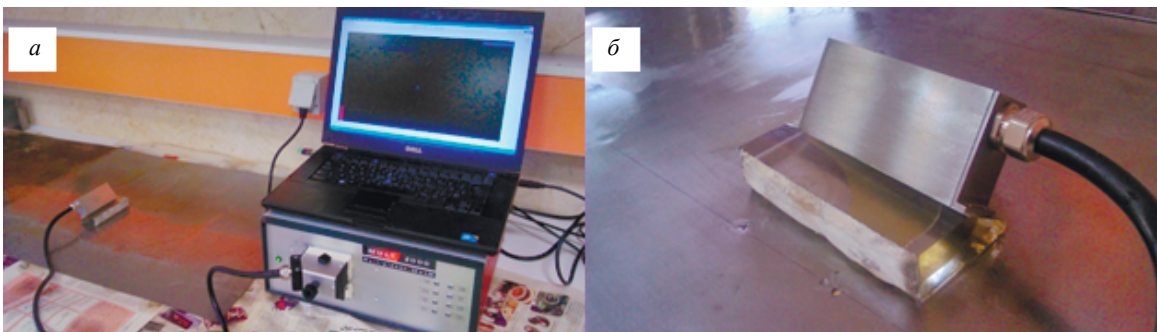


Рис. 3. Установка для ФАР-системы (а); датчик с линейной решеткой (128 элементов) на 31° -клине (б).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Определение параметров мод

Перед началом экспериментов были изучены возможные различные волновые моды для отбора наиболее эффективных из них в целях контроля дефектов.

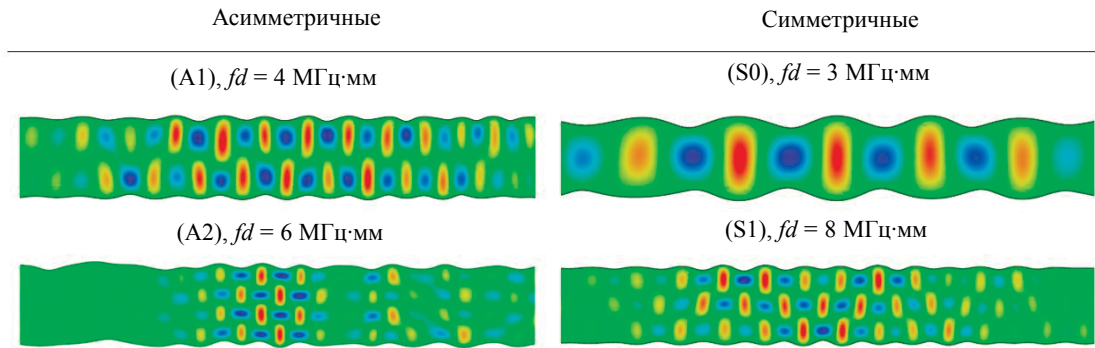


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений для различных мод направленных волн S0, S1, A1 и A2 в стальной пластине: f — частота, d — толщина пластины.

Распределения нормальных напряжений в распространяющихся симметричных и асимметричных модах A1, A2, S0 и S1 показаны на рис. 4 при соответствующих значениях частоты и толщины. Сравнение профиля волны для различных мод показывает, что для A1 и S0 распределение напряжений является почти подповерхностным и глубинным соответственно, в то время как для более высокочастотных мод A2 и S1 напряжение распределяется по толщине.

Эквивалентные смещения также представлены на рис. 5. Что касается толщины пластины, компоненты смещения $U1$ и $U2$ представляют собой распределения горизонтального смещения (сплошная кривая) и вертикального смещения (пунктирная кривая) соответственно. Амплитуды смещения и толщина пластины нормированы на максимальное значение на каждом графике. По значениям $U1_{\max}/U2_{\max}$ мы можем определить, какое смещение является более доминирующим в пластине.

Наконец, выбор моды волны должен быть основан на волновых модах более низкого порядка, поскольку моды более высокого порядка демонстрируют более высокую дисперсию и большее рассеяние из-за более низкой концентрации напряжений. Эти результаты также сопоставимы с предыдущими исследованиями [18].

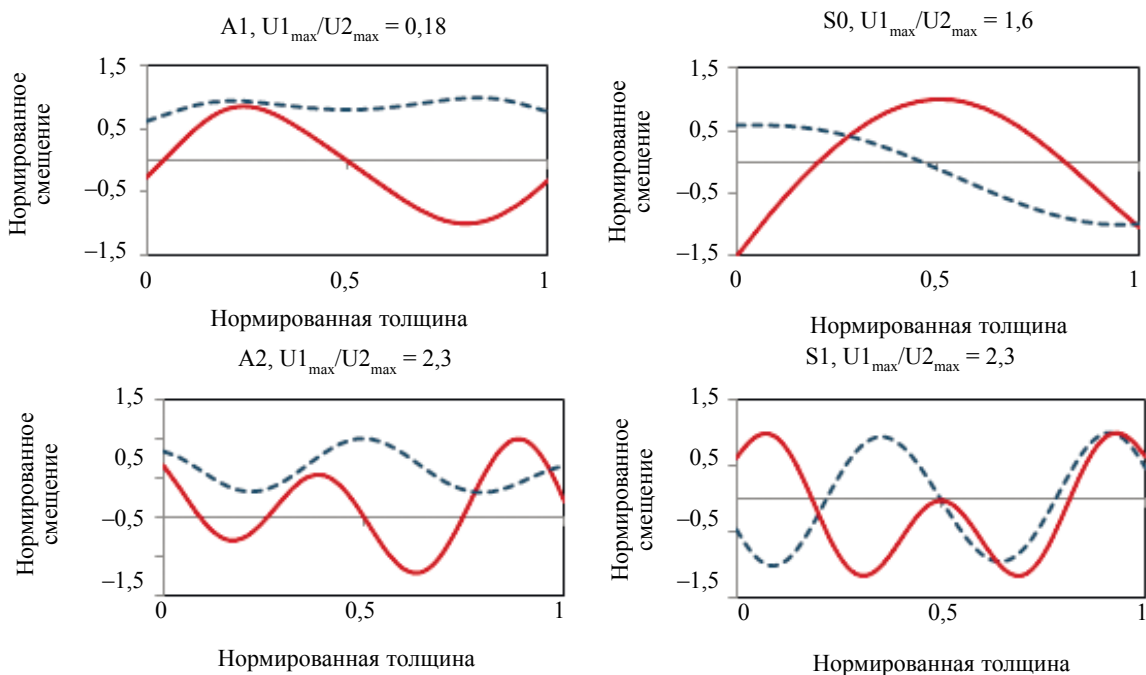


Рис. 5. Компоненты смещения мод распространяющихся волн на различных частотах.

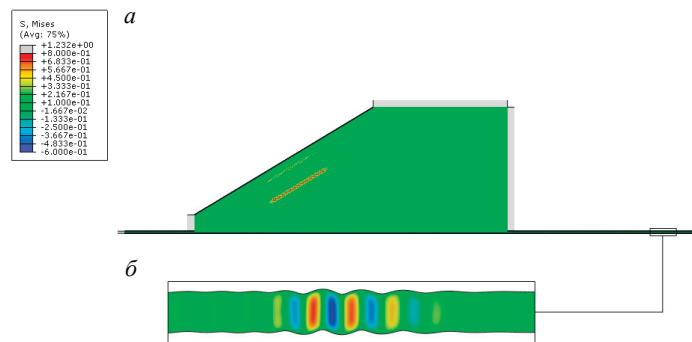


Рис. 6. Результат расчета методом конечных элементов: луч фазированной решетки, направленный под углом 5° в угловом клине 31° , в момент 6 мкс (а); распространение моды A_0 направленной волны в стальной пластине в момент 40 мкс (б).

Метод конечных элементов, описанный в предыдущем разделе, также используется для моделирования распространения волновых мод (рис. 6а). Поскольку S_0 распространяется как высокочастотная мода при $3 \text{ МГц} \cdot \text{мм}$, она ослабляется и затухает, так что мода A_0 будет единственной модой, распространяющейся на большие расстояния (рис. 6б). Анализ методом конечных элементов тестовой модели также показывает характеристики моды A_0 . Поскольку концентрация волновых напряжений находится в средней плоскости пластины, обеспечивается более высокая вероятность обнаружения глубоких дефектов.

5.2. Обнаружение дефектов

Эксперименты проводились на стальной пластине толщиной 0,63 мм с обработанными поверхностными и сквозными дефектами. Геометрия просверленных отверстий и изображение В-скана четырех близко расположенных отверстий сквозной толщины диаметром 1,5 мм показаны на рис. 7. Как можно видеть, изображения В- и S-сканов с использованием моды A_0 направленной волны дают приемлемую чувствительность и разрешение для отверстий малого диаметра и близко расположенных сквозных отверстий.

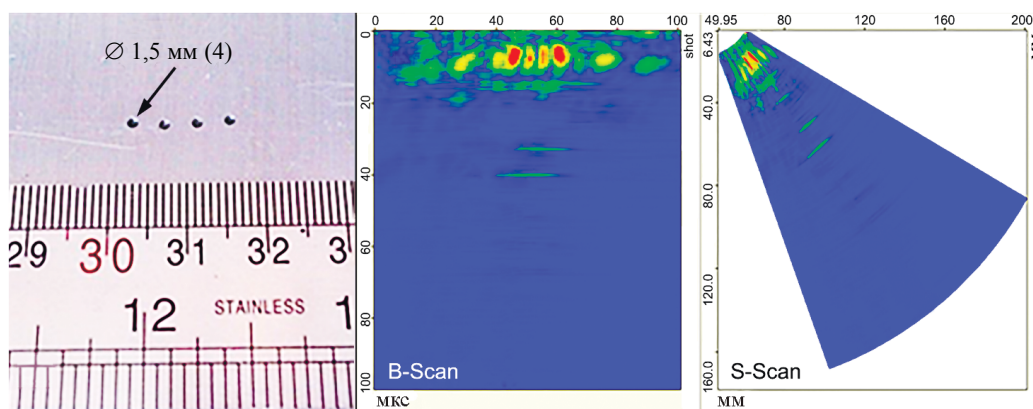


Рис. 7. Изображения В- и S-сканов сквозных отверстий диаметром 1,5 мм, полученные путем секторного сканирования.

Кроме того, была изготовлена новая конфигурация поверхностных и внутренних дефектов для оценки метода секторного сканирования. Дефекты включали два отверстия диаметром 2 мм: просверленное и поверхностное, а также смоделированную поверхностную разветвленную трещину, геометрия и расположение которых показаны на рис. 8. Как видно из результатов В- и S-сканирования, секторное сканирование может четко идентифицировать смоделированную разветвленную трещину и другие отверстия, которые были расположены с большим интервалом, чем в предыдущих процедурах контроля.

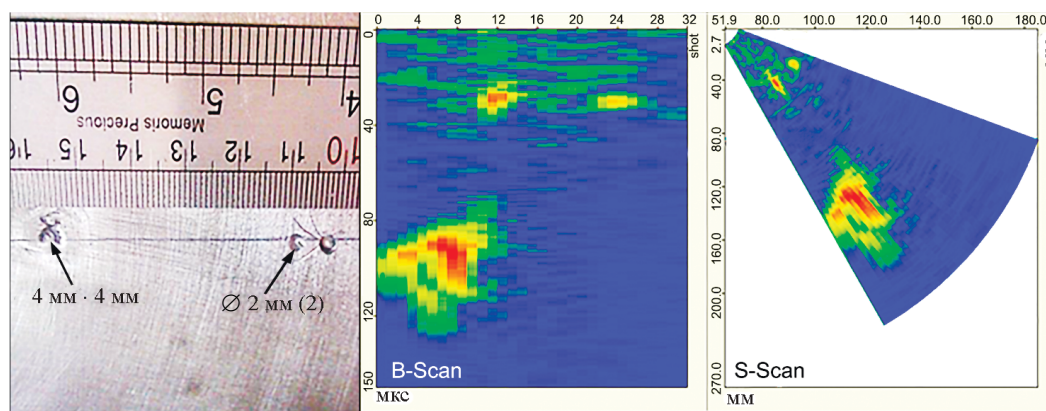


Рис. 8. Изображения В- и S-сканов нескольких отражателей, включая моделируемую разветвленную трещину и две коррозионные язвы диаметром 2 мм, полученные с помощью секторного сканирования.

Секторное сканирование обеспечивает широкий диапазон углового сканирования, позволяющий сканировать такие вышеупомянутые области повреждения, и показывает лучшее осевое разрешение, а не пространственное разрешение, которое было применимо для обнаружения крестообразных дефектов. С другой стороны, рассеяние на дефектах является основным фактором затухания при контроле направленными волнами [19], который необходимо изучить для поиска подходов к устранению недостатков в будущих работах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая ФАР-визуализация используется для контроля дефектов в стальной пластине направленными волнами. Для этой цели высокочастотные моды направленных волн, возникающие в результате использования преобразователя с линейной фазированной решеткой, численно моделируются и экспериментально генерируются с использованием секторного сканирования. Численные результаты используются для исследования поведения высокочастотных волноводных мод. Результаты экспериментов показали, что высокочастотная мода A_0 дает приемлемую чувствительность и разрешение для малых диаметров сквозных и поверхностных дефектов. Секторное сканирование также показало лучшее осевое разрешение, а не пространственное, что оказалось практически применимым для крестообразных дефектов. В будущих работах, чтобы улучшить контроль дефектов, рассеяние от них должно быть устранено путем изучения других методов визуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agarwala V.S., Reed P.L., Ahmad S. Corrosion detection and monitoring-A review // CORROSION. Orlando. Florida. USA, 2000.
2. Krautkrämer J., Krautkrämer H. Ultrasonic testing of materials // Springer Science & Business Media. 2013.
3. Zhu W., Rose J., Barshinger J., Agarwala V. Ultrasonic guided wave NDT for hidden corrosion detection // Journal of Research in Nondestructive Evaluation. 1998. V. 10. P. 205—225.
4. Michaels J.E., Michaels T.E. Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates // Wave Motion. 2007. V. 44. P. 482—492.
5. Rose J.L., Barshinger J. Using ultrasonic guided wave mode cutoff for corrosion detection and classification // Ultrasonics Symposium. 1998. Proceedings. 1998. IEEE. 1998. P. 851—854.
6. Silva M., Gouyon R., Lepoutre F. Hidden corrosion detection in aircraft aluminum structures using laser ultrasonics and wavelet transform signal analysis // Ultrasonics. 2003. V. 41. P. 301—305.
7. Sargent J. Corrosion detection in welds and heat-affected zones using ultrasonic Lamb waves // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2006. V. 48. P. 160—167.
8. Jhang K.-Y., Shin M.J., Lim B.O. Application of the laser generated focused-Lamb wave for non-contact imaging of defects in plate // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. e1265—e1268.
9. Rathod V., Mahapatra D.R. Ultrasonic Lamb wave based monitoring of corrosion type of damage in plate using a circular array of piezoelectric transducers // NDT & E International. 2011. V. 44. P. 628—636.
10. Beard M., Lowe M., Cawley P. Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts // Journal of Materials in Civil Engineering. 2003. V. 15. P. 212—218.

11. *Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review // *NDT & E International*. 2006. V. 39. P. 525—541.
 12. *Deutsch W., Cheng A., Achenbach J.* Self-focusing of Rayleigh waves and Lamb waves with a linear phased array // *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*. 1997. V. 9. P. 81—95.
 13. *Sicard R., Chahbaz A., Goyette J.* Guided Lamb waves and L-SAFT processing technique for enhanced detection and imaging of corrosion defects in plates with small depth-to wavelength ratio // *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*. 2004. V. 51. P. 1287—1297.
 14. *Sicard R., Goyette J., Zellouf D.* A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures // *Ultrasonics*. 2002. V. 39. P. 487—494.
 15. *Prager J., Hoever C., Brekow G., Kreutzbruck M.* Flaw detection with guided waves using phased array technique / *Proceedings on the 10th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT)*. 2010.
 16. *Rose J.L.* Ultrasonic waves in solid media. Cambridge university press, 2004.
 17. *Azar L., Shi Y., Wooh S.-C.* Beam focusing behavior of linear phased arrays // *NDT & E International*. 2000. V. 33. P. 189—198.
 18. *Ranjbar Naserabadi M.J., Sodagar S.* Ultrasonic High Frequency Lamb Waves for Evaluation of Plate Structures // *Acoustical Physics*. 2017. V. 63. P. 402—409.
 19. *Naserabadi M.R., Hayatgheib B., Sodagar S.* A Simulation Study of Attenuation Factors in a Gas Pipeline Guided Wave Testing / *4th Iranian International NDT Conference*. 2017.
-