

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КАК СПОСОБ БОРЬБЫ СО СТРУКТУРНЫМ ШУМОМ

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.В. Гончарский^{2,**}, С.Ю. Романов^{2,***}, С.Ю. Серёжников^{2,****}

¹ООО ЭХО+, Россия 123458 Москва, Технопарк Строгоно

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия 119992 Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 4

E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **gonchar@srcc.msu.ru;

romanov60@gmail.com; *s2110sj@gmail.com

Поступила в редакцию 18.07.2023; после доработки 31.07.2023

Принята к публикации 01.08.2023

Предлагается использовать метод ультразвуковой томографии, основанный на решении обратной коэффициентной задачи, для уменьшения уровня структурных шумов. Математические модели, используемые в ультразвуковой томографии, хорошо описывают такие физические эффекты как эффекты рефракции, дифракции и перераспределения. Логично ожидать, что реконструкция внутренней структуры металлических образцов с помощью ультразвуковой томографии будет более эффективной по сравнению с методами цифровой фокусировки антенны (ЦФА). В силу нелинейности обратной задачи ультразвуковой томографии используется итерационный MultiStage метод, обеспечивающий сходимость к глобальному минимуму функционала невязки. В статье проведены результаты численных экспериментов по восстановлению изображения внутренней структуры сварного соединения, в котором могут находиться боковые цилиндрические отверстия и модели трещин. Область наплавленного металла представлена в виде участков, построенных по принципу диаграмм Вороного. В каждом участке скорость постоянна и ее значение распределено случайно. В принятой в статье модели структурный шум формируется из-за многократного рассеяния на границах участков с разной скоростью звука. Предполагалось, что антенная решетка располагается на внешней поверхности объекта контроля известной толщины. Полученные результаты показывают, что томографический метод позволяет определять форму и скорость звука в слабоконтрастных отражателях, для которых ЦФА-метод малоэффективен.

Ключевые слова: обратная коэффициентная задача, ультразвуковая томография, ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), структурный шум, антенная решетка, метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА).

ULTRASOUND TOMOGRAPHY BASED ON THE COEFFICIENT INVERSE PROBLEM AS A WAY TO COMBAT STRUCTURAL NOISE

E.G. Bazulin^{1,*}, A.V. Goncharsky^{2,**}, S.Yu. Romanov^{2,***}, S.Yu. Seryozhnikov^{2,****}

¹ECHO+ LLC, Technopark Strogino, Moscow, 123458, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Vorobyovy Gory, 1, p. 4, Moscow, 119992, Russia

E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **gonchar@srcc.msu.ru;

romanov60@gmail.com; *s2110sj@gmail.com

The paper proposes to use the ultrasound tomography method based on the solution of the inverse coefficient problem to reduce the level of structural noise. Mathematical models used in ultrasonic tomography well describe such physical effects as refraction, diffraction and redispersion effects. It is logical to expect that reconstruction of the internal structure of metallic samples using ultrasound tomography will be more efficient compared to digital antenna focusing (DAF) techniques. Due to the nonlinearity of the inverse problem of ultrasound tomography, an iterative MultiStage method is used to ensure convergence to the global minima of the non-convexity functional. The paper presents the results of numerical experiments to restore the image of the internal structure of the welded joint, which may contain lateral cylindrical holes and crack models. The region of the welded metal is represented in the form of sections constructed according to the principle of Voronoi diagrams. In each section the velocity is constant and its value is randomly distributed. In the model adopted in the paper, the structural noise is formed due to multiple scattering at the boundaries of sections with different sound velocity. It was assumed that the antenna array is located on the outer surface of the control object of known thickness. The results obtained show that the tomographic method allows us to determine the shape and speed of sound in low-contrast reflectors, for which the CFA method is ineffective.

Keywords: inverse coefficient problem, ultrasonic tomography, ultrasonic nondestructive testing (NDT), structural noise, antenna array, digital antenna focusing (DAF) method.

DOI: 10.31857/S0130308223100019, EDN: WZDHAY

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) в настоящее время является широко используемым методом благодаря его высокой чувствительности к основным типам отражателей, таким

как трещины и непровары, и к широкому спектру контролируемых материалов (металлы, пластмассы, композитные материалы и т.д.). Наличие серийно выпускаемых приборов и методик проведения контроля делают УЗК достаточно дешевым. Основными недостатками УЗК являются трудность оценки реального размера отражателя, а также сложность контроля крупнозернистых металлов, которые выделяют в отдельный класс — материалы со структурным шумом [1]. Такие объекты контроля, как чугун с шаровидным графитом, аустенитные сварные соединения с крупными анизотропными зернами, можно рассматривать как пример материалов с высоким уровнем структурного шума. В отличие от шума приемной усилительной аппаратуры в материалах со структурным шумом отношение сигнал/шум не увеличивается при увеличении энергии зондирующего сигнала, так как помимо увеличения амплитуды импульсов, рассеянных отражателями, так же увеличивается и амплитуда импульсов, рассеянных на структуре. Ни согласованная фильтрация, ни применение сложных зондирующих сигналов из-за подобия спектров эхосигнала и структурной помехи существенно не повышают отношение сигнал/шум.

Один из способов уменьшения уровня структурного шума является когерентная обработка эхосигналов с целью получения изображения отражателей при использовании антенной решетки, однако и такой подход недостаточно эффективен, так как пространственно-временное распределение эхосигналов, рассеянных отражателями и структурой материала, достаточно близки. В статье [2] предлагается размещать элементы антенной решетки на расстояниях больше, чем радиус корреляции структурного шума, но это приводит к увеличению уровня шума изображения из-за грубого шага антенной решетки. Чем больше размеры антенной решетки и чем короче зондирующий импульс, тем меньше уровень структурного шума [3]. Для уменьшения уровня когерентных помех в радиолокации используют метод декорреляции (выбеливания) [4]. Однако попытка перенести данный подход для целей УЗК на данный момент оказалась недостаточно эффективной [5].

В практике УЗК для восстановления изображения отражателей, по эхосигналам измеренным антенной решеткой, используют метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [6—8]. Однако методу ЦФА присущи недостатки:

1. Метод рассчитывает «поле» точечного отражателя и не учитывает особенности рассеяния на несплошностях разного типа, например, импульс обегания при восстановлении методом ЦФА всегда будет порождать ложный блик.

2. Для эффективного применения метода ЦФА с учетом отражений от границ объекта контроля нужно знать его акустические свойства и иметь информацию о его конструкции.

3. Метод ЦФА не учитывает изменения фазы эхосигнала при преломлении и отражении от границ объекта контроля. Метод инверсного C-SAFT свободен от этого недостатка и позволяет восстановить изображение границ отражателей в виде величины пропорциональной коэффициенту отражения на границе.

4. Метод ЦФА не учитывает изменение формы эхосигнала, возникающее из-за смещения точки формирования изображения от акустической оси призмы и из-за частотно-зависимого затухания в материале объекта контроля.

В последние годы возрос интерес к разработке новых ультразвуковых томографических методов исследований, основанных на решении обратной коэффициентной задачи для волнового уравнения [9—11]. За рубежом данный метод называется Full Waveform Inversion [12]. Решение обратной коэффициентной задачи позволяет восстановить поле скоростей в объекте контроля. Значимые результаты получены в разработке ультразвуковых томографов для диагностики рака молочной железы на ранних стадиях заболевания [13, 14]. Все больше работ, связанных с томографическими схемами исследования, появляется и в области неразрушающего контроля [15, 16]. В работе [17] исследованы возможности классических томографических схем с поворотом объекта на 360 град. Реконструировано поле скоростей объекта, содержащего низкоконтрастные отражатели с разной скоростью продольной волны. Под контрастностью в дальнейшем будем понимать величину вариации скорости продольной волны в пределах образца.

Особенностью обратных задач волновой томографии является их нелинейность, что сильно усложняет их решение в отличие от линейных обратных задач. Наиболее распространенным методом решения коэффициентных обратных задач является минимизация функционала невязки между рассчитанным и экспериментально измеренными эхосигналами. Для скалярных волновых моделей получено представление для градиента функционала невязки, которое вычисляется через решение сопряженной задачи [11]. Основная проблема заключается в том, что из-за нелинейности обратных задачах волновой томографии функционал невязки содержит локальные минимумы, в которых может останавливаться итерационный процесс градиентной минимизации.

Поиск глобального минимума функционалов является хорошо известной проблемой, которой посвящено большое количество работ. В общем случае задача не имеет решения. В отдельных случаях удается достичь успеха благодаря использованию дополнительной физической информации [18]. Авторами настоящей статьи предложен MultiStage метод (MS-метод) как способ приближенного решения обратной задачи. Дополнительной физической информацией, используемой в предложенном методе, является тот факт, что при частотах, стремящихся к нулю, обратная задача волновой томографии сводится к решению линейных интегральных уравнений [19].

Обратная коэффициентная задача позволяет одновременно решать две задачи, чего не может сделать в явном виде метод ЦФА: определить конструкцию объекта контроля и реконструировать его поле скоростей. Поскольку математическая модель хорошо описывает эффекты рефракции, дифракции и перерасеяния на отражателях произвольной формы, восстановленное поле скоростей в идеальном случае не содержит ложных фантомов.

Однако методы ультразвуковой томографии в приложении к неразрушающему контролю металлов имеют ограничение. Традиционно методы томографии хорошо работают при зондировании исследуемого объекта со всех сторон, как это делается, например, в рентгеновской томографии. Но в УЗК типичной ситуацией является возможность доступа только к одной стороне объекта контроля. Если знать форму отражающего дна, то в методах ультразвуковой томографии появляется возможность использования и регистрации импульсов, отраженных от дна. Именно эти импульсы обеспечивают зондирование объекта контроля в режиме на прохождение. Благодаря этому в ультразвуковой томографии возможна реконструкция не только границ отражателей, но и определение поля скоростей внутри них.

Результаты, полученные в статье, базируются на большом количестве численных экспериментов в рамках скалярной волновой модели. Даже в скалярной модели обратные задачи волновой томографии представляются достаточно сложными с вычислительной точки зрения, поскольку объем неизвестных в трехмерном варианте может составлять несколько миллионов. По мнению авторов статьи, возможности ультразвуковых томографических методов, как способа борьбы со структурными шумами, продемонстрированные в скалярной волновой модели, должны сохраниться и в векторных моделях.

2. ПОСТАНОВКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

На рис. 1 представлена схема томографического эксперимента с использованием антенной решетки, расположенной непосредственно на поверхности контролируемого сварного соединения. Антенная решетка состоит из 240 элементов размерами 0,3 мм с зазором 0,02 мм. Излучение происходит каждым восьмым элементом, а регистрация происходит всеми элементами антенной решетки. Исследуемый объект содержит боковые цилиндрические отверстия (БЦО) диаметром

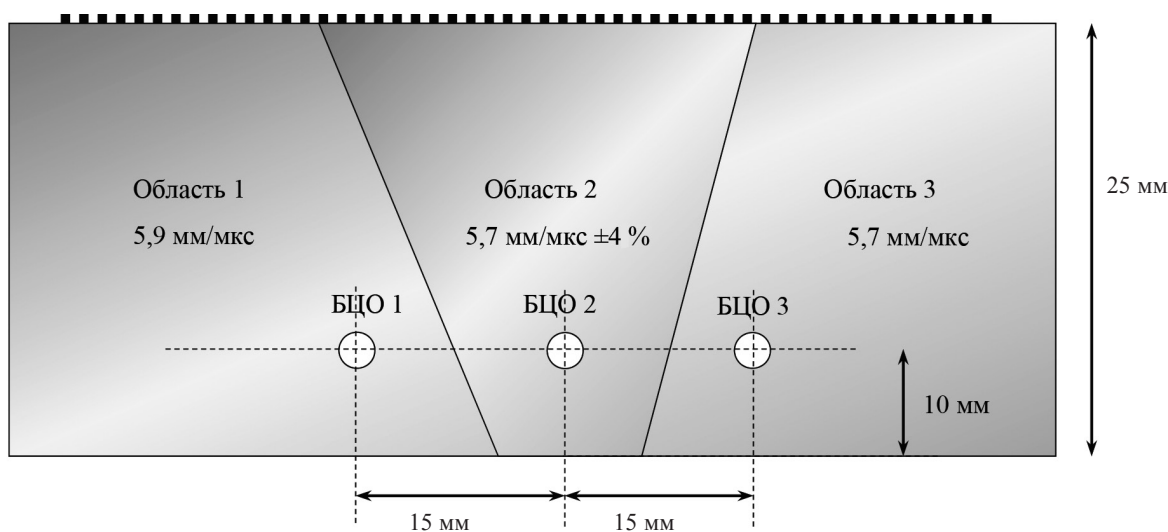


Рис. 1. Схема томографического эксперимента.

2 мм или модели трещин длиной 5 мм с разным контрастом. Структурный шум формируется из-за того, что область наплавленного металла представлена в виде участков, сформированных по принципу построения диаграмм Вороного. В пределах каждого участка скорость постоянна и для каждого участка ее значение распределено случайно.

Особенностью решения обратных задач УЗК является распространение в объекте нескольких волн (продольной, поперечной вертикальной поляризации и т.д.). В данной публикации обратные задачи рассматриваются в скалярной модели, описывающей распространение только одной волны. Будем считать, что волновое поле удовлетворяет волновому уравнению:

$$c(r)u_{rr}(r, t) - \Delta u(r, t) = \delta(r - r_0)g(t), u(r, t = 0) = u_r(r, t = 0) = 0. \quad (1)$$

Здесь $u(r, t)$ — скалярное волновое поле; $r \in R^2$; $c^{-0.5}(r) = v(r)$ — скорость распространения волн; r_0 — координаты точечного источника; $g(t)$ описывает излучаемый источником импульс. Нижняя граница считается известной и на ней ставится условие свободной поверхности. Задача определения $c(r)$ рассматривается как коэффициентная обратная задача, которая в такой постановке является нелинейной [11]. Рассмотрим функционал невязки $\Phi(c)$ [11]:

$$\Phi(c) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \int_0^T (u^{ij}(t; c) - U^{ij}(t))^2 dt.$$

Здесь $u^{ij}(t; c)$ — значения смоделированного волнового поля, полученного путем решения основной задачи (1) при заданном $c(r)$; $U^{ij}(t)$ — данные, регистрируемые детекторами, где j — номер излучающего элемента, i — номер приемного элемента ($i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$). Обратная задача состоит в нахождении функции $\bar{c}(r)$, минимизирующей функционал $\Phi(c)$. Известен способ вычисления производной функционала $\Phi(c)$ [11]:

$$\Phi'_c(c) = \int_0^T w_i(r, t) u_i(r, t) dt,$$

где $u(r, t)$ — решение основной задачи (1); $w(r, t)$ — решение сопряженной задачи:

$$c(r)w_{rr}(r, t) - \Delta w(r, t) = u(r, t)|_r - U, w(r, t = T) = w_r(r, t = T) = 0. \quad (2)$$

Для аппроксимации дискретного Лапласиана использована разностная схема 4-го порядка с шаблоном 5×5 точек [20].

Значимым результатом в области волновой томографии является предложенный авторами статьи MS-метод как способ построения приближенного решения обратной задачи. В основе MS-метода лежит априорная физическая информация, а именно, при стремлении центральной частоты зондирующих сигналов к нулю обратная задача становится линейной. Последнее означает, что можно обрезать высокочастотную часть спектра так, что функционал невязки станет выпуклым.

На первом этапе MS-метода используются только низкие частоты зондирующего сигнала, что обеспечивает сходимость итерационного процесса к некоторому приближенному решению с низким разрешением. На втором этапе решение обратной задачи выполняется с полным спектром имеющегося сигнала и с начального приближения, полученного на первом этапе. Такой подход обеспечивает сходимость итерационного процесса и высокое пространственное разрешение. На рис. 2 приведены примеры зондирующих импульсов с центральными частотами 2 и 5 МГц, используемые на первом и втором этапах MS-метода.

Для работы MS-метода необходимо, чтобы зондирующий сигнал содержал низкочастотные компоненты. В предложенном методе зондирование осуществляется широкополосными импульсами, причем низкочастотная часть обеспечивает сходимость итерационного процесса, а высокие частоты отвечают за разрешающую способность.

Методы решения обратных задач волновой томографии как в скалярной, так и в векторной модели хорошо распараллеливаются. Высокая вычислительная сложность этих задач приводит к необходимости использовать суперЭВМ. Наиболее перспективным является использование GPU-платформ [21, 22].

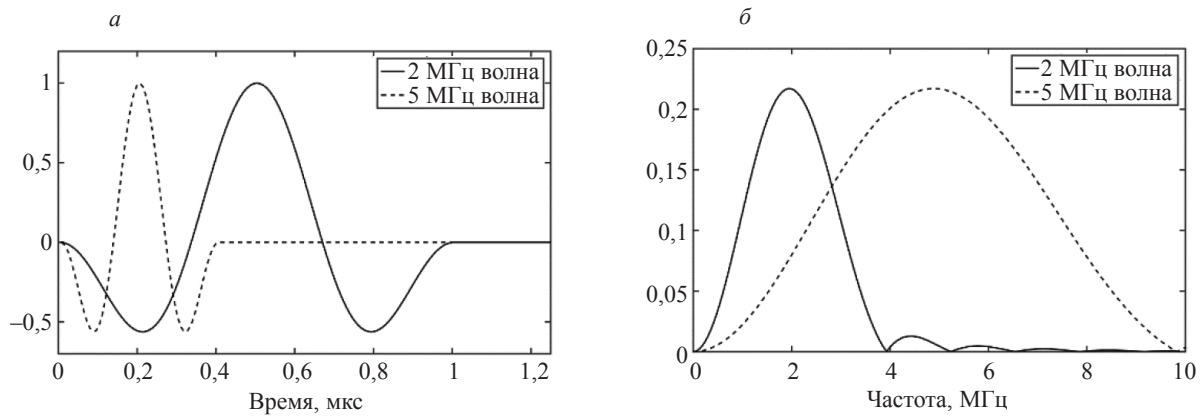


Рис. 2. Форма зондирующих импульсов MS-метода (а) и их частотные спектры (б).

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования эффективности методов ультразвуковой томографии для решения задачи диагностики сварных соединений использовалось несколько виртуальных образцов, содержащих как БЦО, так и трещины. Нижняя граница образца считалась известной, и на ней ставилось условие свободной границы. В ультразвуковой томографии по рассчитанным эхосигналам восстанавливалось поле скоростей распространения волны с помощью MS-метода. Для реконструкции использовалось два или три этапа. На первом этапе MS-метода объект контроля зондировался импульсами с более низкой центральной частотой, что обеспечивало сходимость итераций. На втором этапе использовалась более высокая центральная частота, и в качестве начального приближения использовалось поле скоростей, полученное на первом этапе.

3.1. Образец с тремя отверстиями бокового сверления

На рис. 3 представлено поле скоростей смоделированного образца. Область 1 (левая часть образца) состоит из металла со скоростью звука, равной 5,9 мм/мкс, а скорость звука в области 3 (правой части) равна 5,7 мм/мкс. Область 2 наплавленного металла в середине содержит «кристаллическую» структуру, сформированную по принципу диаграмм Вороного. Средняя скорость звука в этой области составляет 5,7 мм/мкс, вариация скорости в «кристаллитах» составляет $\pm 4\%$, а их средний размер 0,5 мм. В каждой из областей содержится по одному БЦО диаметром 2 мм. Расчеты проводились для БЦО, заполненных материалом со скоростями звука 5,1 и 3,6 мм/мкс. Шкала справа от рисунков показывает скорость распространения ультразвуковой волны.

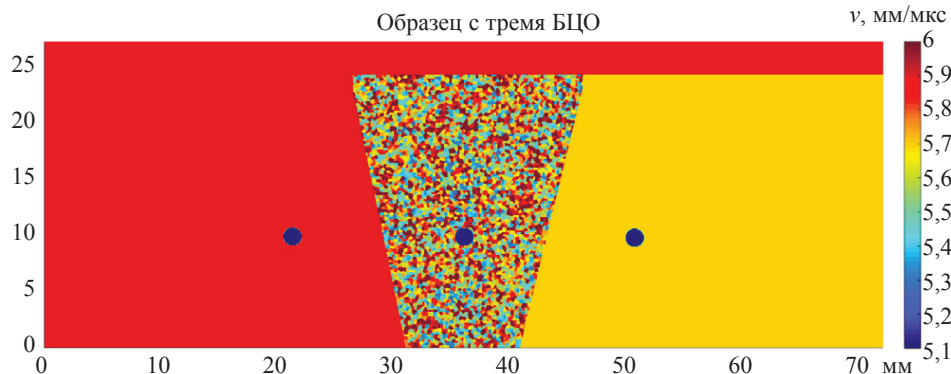


Рис. 3. Поле скоростей образца с тремя БЦО, скорость звука в которых равна 5,1 мм/мкс.

В MS-методе использовались эхосигналы на прямом луче, однократно и двукратно отраженные от дна образца. Схема размещения антенной решетки в модельном эксперименте соответствовала рис. 1. Диаграмма направленности элементов антенной решетки по излучению и приему считается близкой к цилиндрической.

3.1.1. Скорость звука внутри БЦО 5,1 мм/мкс (низкий контраст)

На рис. 4 показано восстановленное MS-методом поле скоростей образца, показанного на рис. 3. На рис. 4а приведено изображение, полученное на первом этапе MS-метода с длиной волны 3 мм. Хорошо определяется средняя скорость в областях 1, 2 и 3. Все три БЦО хорошо локализируются, однако скорость в материале заполнения БЦО отличается от скорости, заданной в образце на рис. 3. На втором этапе MS-метода поле скоростей реконструировано с использованием импульсов с длиной волны 1,2 мм (5 МГц), используя рис. 4а как начальное приближение. Как видно из рис. 4б, реконструированное поле скоростей в БЦО приближается к заданному значению скорости, а структура «кристаллитов» восстановилась с более высокой разрешающей способностью.

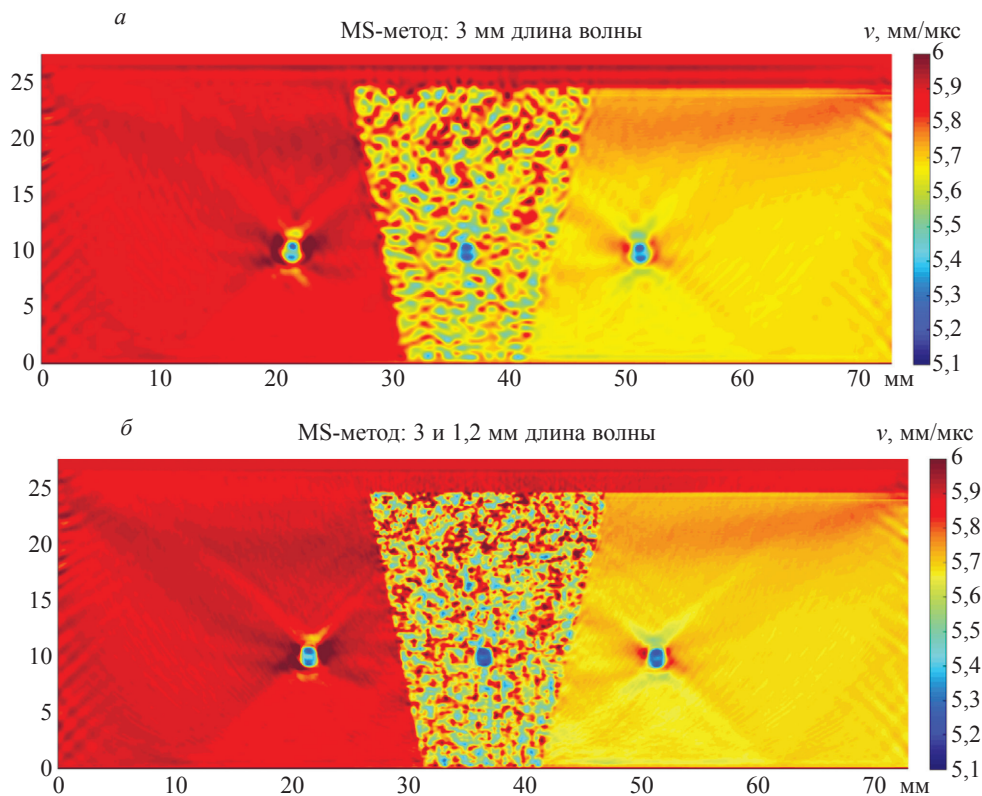


Рис. 4. Восстановленное MS-методом поле скоростей образца с тремя отверстиями БЦО: первый этап с длиной волны 3 мм (а); второй этап с длиной волны 1,2 мм (б).

На рис. 5а приведено изображение отражателей, восстановленное методом ЦФА по акустической схеме на прямом луче для случая однородной среды при расчете лучей в диапазоне углов ± 30 град. Так как волновое сопротивление материала БЦО близко к волновому сопротивлению материала сварного соединения, то блики границы БЦО в основном металле практически незаметны (в отличие от рис. 4), а блика границы БЦО в наплавленном металле не видно вообще. Блик дна меняет глубину из-за того, что скорость в образце предполагается постоянной. По бликам структурного шума можно определить границы области наплавленного металла. На рис. 5б показано изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Несмотря на увеличение диапазона углов качество изображения ухудшилось, так как не учитывается неодно-

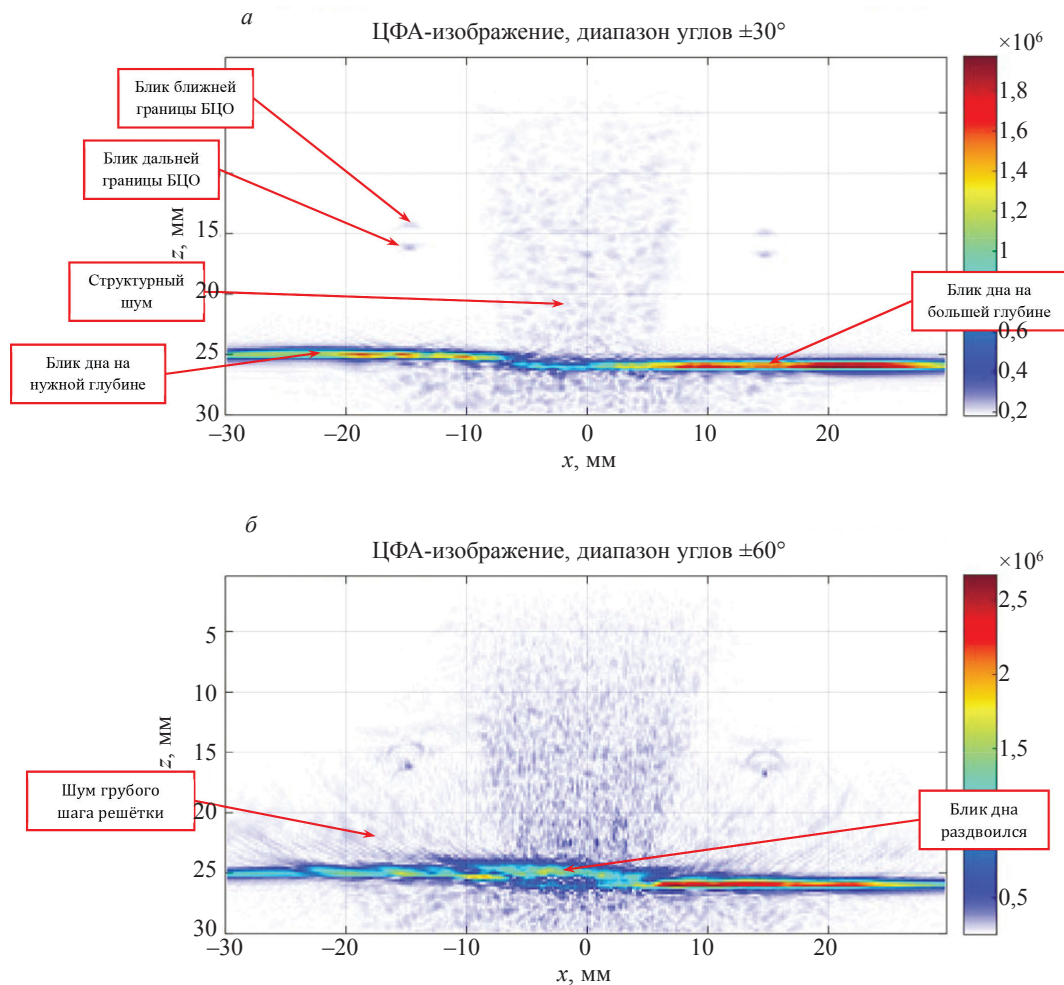


Рис. 5. Изображения отражателей в образце с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

родность акустических свойств образца: возрос шум у дна образца, видны ближние и дальние границы трещин, которые не лежат на окружности диаметром 3 мм из-за того, что скорости в основном металле в областях 1 и 3 разные, блик дна в области 2 раздвоился. Блики БЦО в наплавленном металле по-прежнему не удается обнаружить.

3.1.2. Скорость звука внутри БЦО 3,6 мм/мкс (средний контраст)

На рис. 6а показано поле скоростей образца с тремя БЦО с более контрастным материалом заполнения со скоростью звука 3,6 мм/мкс. Для восстановления более контрастного изображения в MS-методе на первом этапе нужно использовать излучение достаточно большой длины волны, равной 5 мм. На рис. 6б, в приведены изображения, восстановленные MS-методом на первом и третьем этапах с длинами волн 5; 2,5 и 1,2 мм. Как видно из рис. 6б, на первом этапе MS-метода определяется локализация отверстий как внутри области наплавленного металла, так и вне его. На рис. 6в приведено реконструированное изображение, полученное на третьем этапе MS-метода с использованием в качестве начального приближения решения, полученного на втором этапе. Как видно из рис. 6в, качество изображения и разрешающая способность улучшаются. Видно, что реконструированная скорость в отверстиях, равная примерно 4,5 мм/мкс, существенно меньше скорости в металле. Дальнейшее повышение частоты в данном случае улучшает лишь изображение кристаллов в верхней части образца.

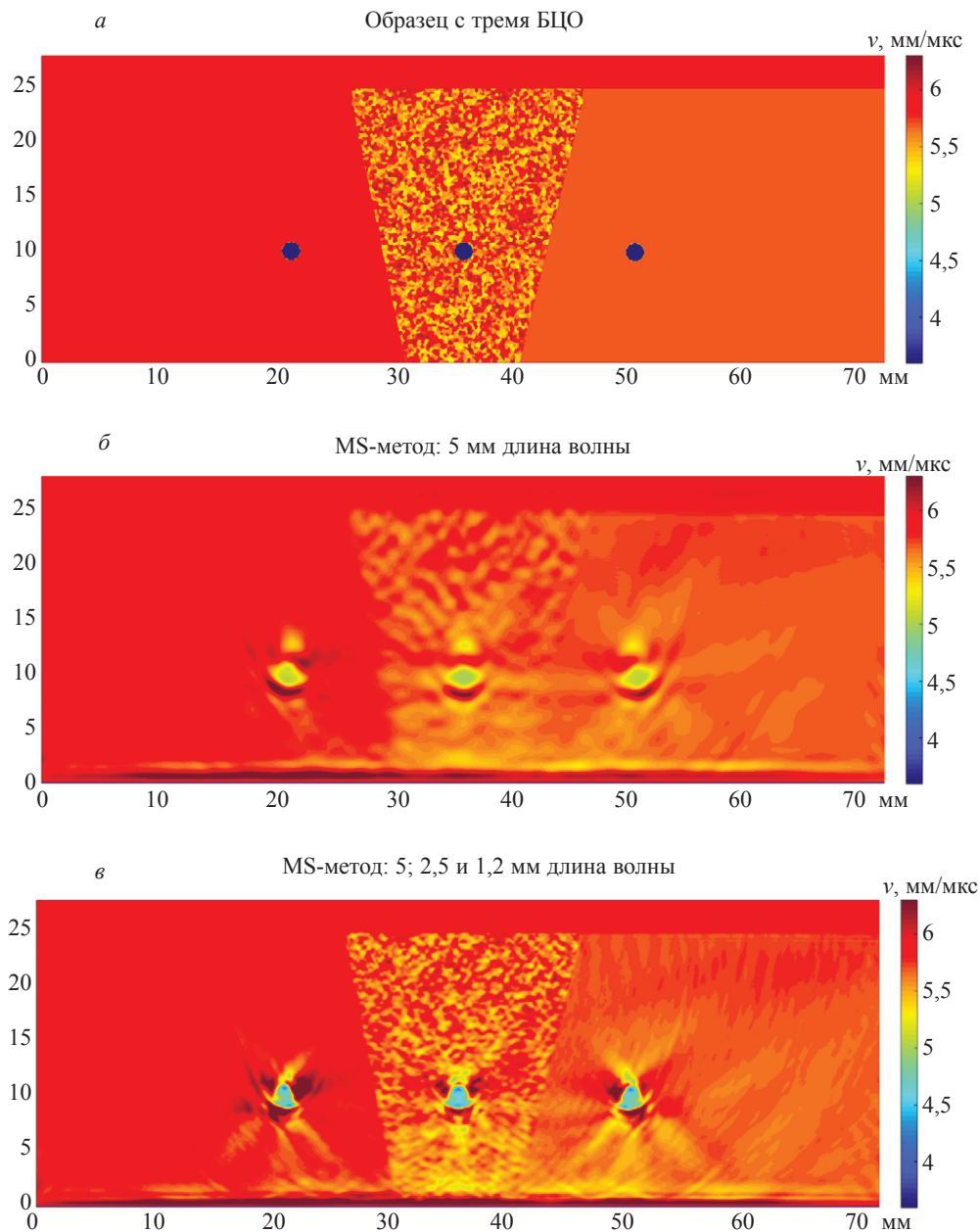


Рис. 6. Образец с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс (*a*). Поле скоростей, восстановленное MS-методом на первом (*б*) и третьем (*в*) этапах с длинами волн 5; 2,5 и 1,2 мм соответственно.

На рис. 7*a* приведено изображение образца с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА в диапазоне углов ± 30 град. Из-за уменьшения волнового сопротивления материала в БЦО, в отличие от рис. 5, стали хорошо видны блики части ближней границы БЦО в областях 1 и 3 основного металла, блики дальней границы и блики дальней границы при двукратном отражении импульса внутри БЦО. В наплавленном металле блики границы БЦО 2 стали более заметны, чем на рис. 5. На рис. 7*б* показано ЦФА-изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Как и на рис. 5*б*, качество изображения ухудшилось: возрос шум у дна образца, видны ближние и дальние границы трещин, которые не лежат на окружности диаметром 3 мм из-за того, что скорости звука в основном металле слева и справа различаются. Блики границ БЦО 2 в наплавленном металле стали менее заметны.

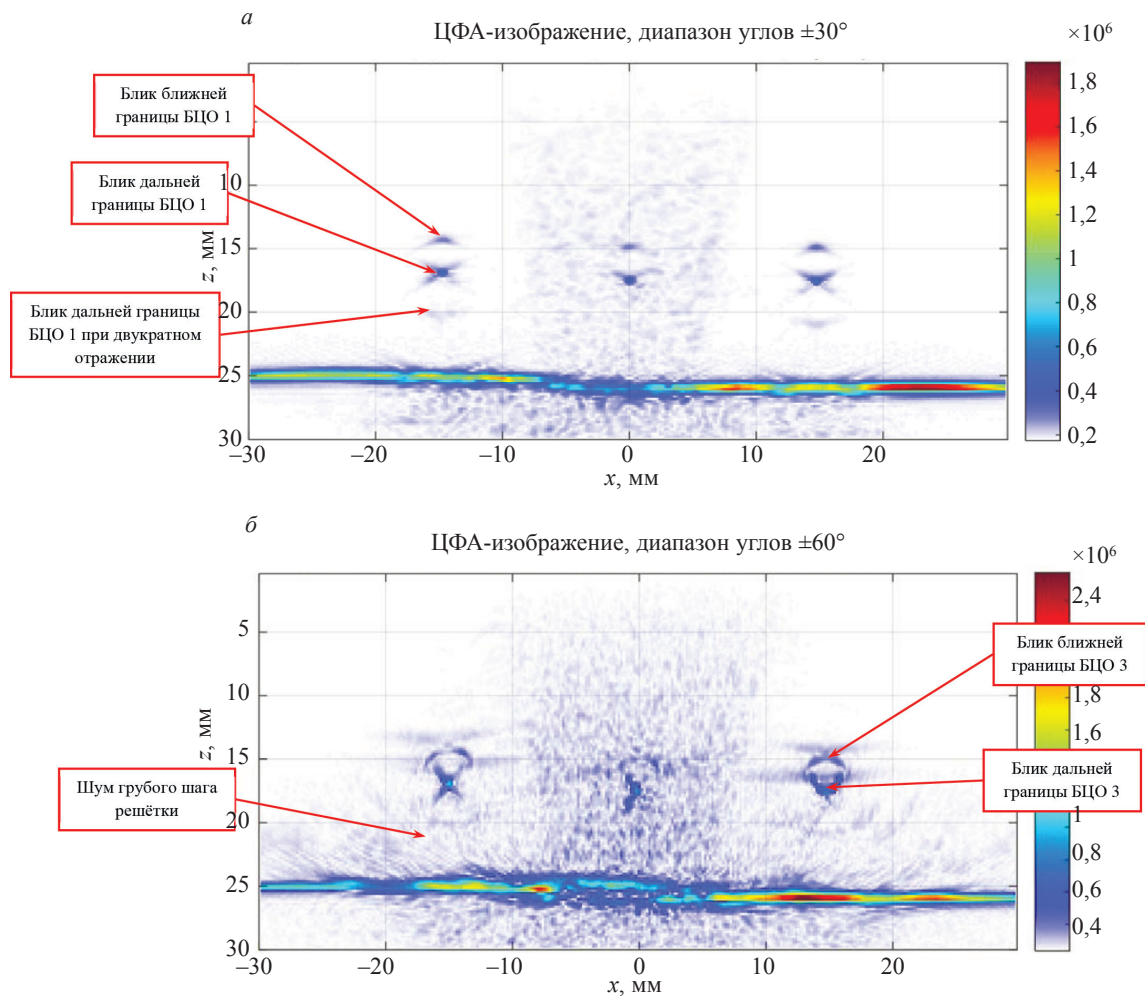


Рис. 7. Изображения отражателей в образце с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

3.2. Образец с четырьмя трещинами

Большой интерес для задач неразрушающего контроля представляет обнаружение трещин различной ориентации в сварном соединении.

3.2.1. Скорость звука внутри модели трещины 5,1 мм/мкс (низкий контраст)

На рис. 8 приведено изображение поля скоростей образца с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс. Ширина трещин равна 0,5 мм, а длина — 5 мм. Трещины в основном металле, отмеченные выносками 1 и 4, хорошо видны. Две трещины, расположенные по границе основного и наплавленного металла, отмеченные выносками 2 и 3, практически не заметны даже на идеальном изображении образца. Свойства области наплавленного металла описаны в разделе 3.1.

На рис. 9 приведены реконструированные MS-методом поля скоростей в образце. На рис. 9а показано изображение, полученное на первом этапе с длиной волны 3 мм. Трещины 1 и 4 достаточно хорошо видны. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла обнаружить не удастся. На рис. 9б приведено изображение, полученное на втором этапе с длиной волны 1,2 мм. Локализация и точность реконструкции трещин 1, 4 улучшилась и ее можно оценить как четверть длины волны. Трещины 2 и 3 по-прежнему обнаружить не удастся. Восстановленные значения скорости звука в моделях трещин 1 и 4 отличаются от заданных в образце, показанном на рис. 8, примерно на 0,5 мм/мкс.

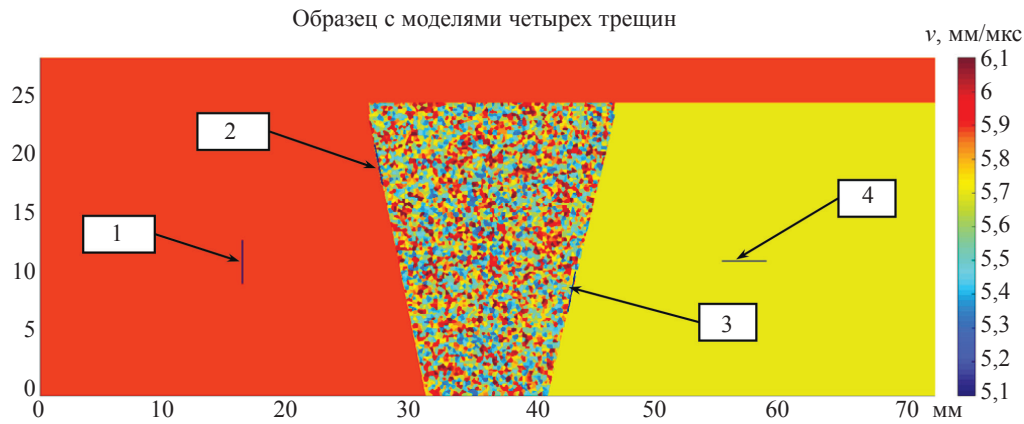


Рис. 8. Поле скоростей образца с моделями четырех трещин разной ориентации. Скорость звука в трещинах составляет 5,1 мм/мкс.

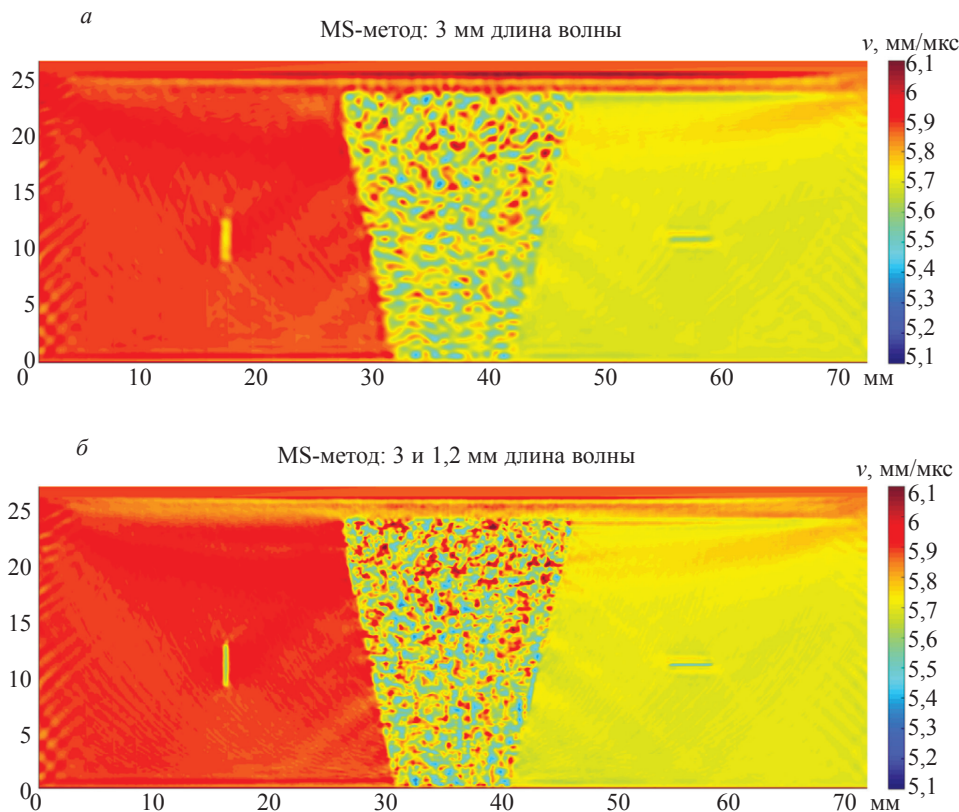


Рис. 9. Восстановленное MS-методом поле скоростей образца с четырьмя трещинами: первый этап с длиной волны 3 мм (*a*); второй этап с длиной волны 1,2 мм (*б*).

На рис. 10*a* приведено изображения образца с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА при расчете лучей в диапазоне углов ± 30 град. Виден блик трещины 4 в области 3, от поверхности которой эхосигналы регистрируются на прямом луче, а от трещины 1 в области 1 остался едва заметный блик нижнего края. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла обнаружить не удается. На рис. 10*б* показано ЦФА-изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Возрос шум у дна образца, блик трещины справа раздвоился из-за того, что

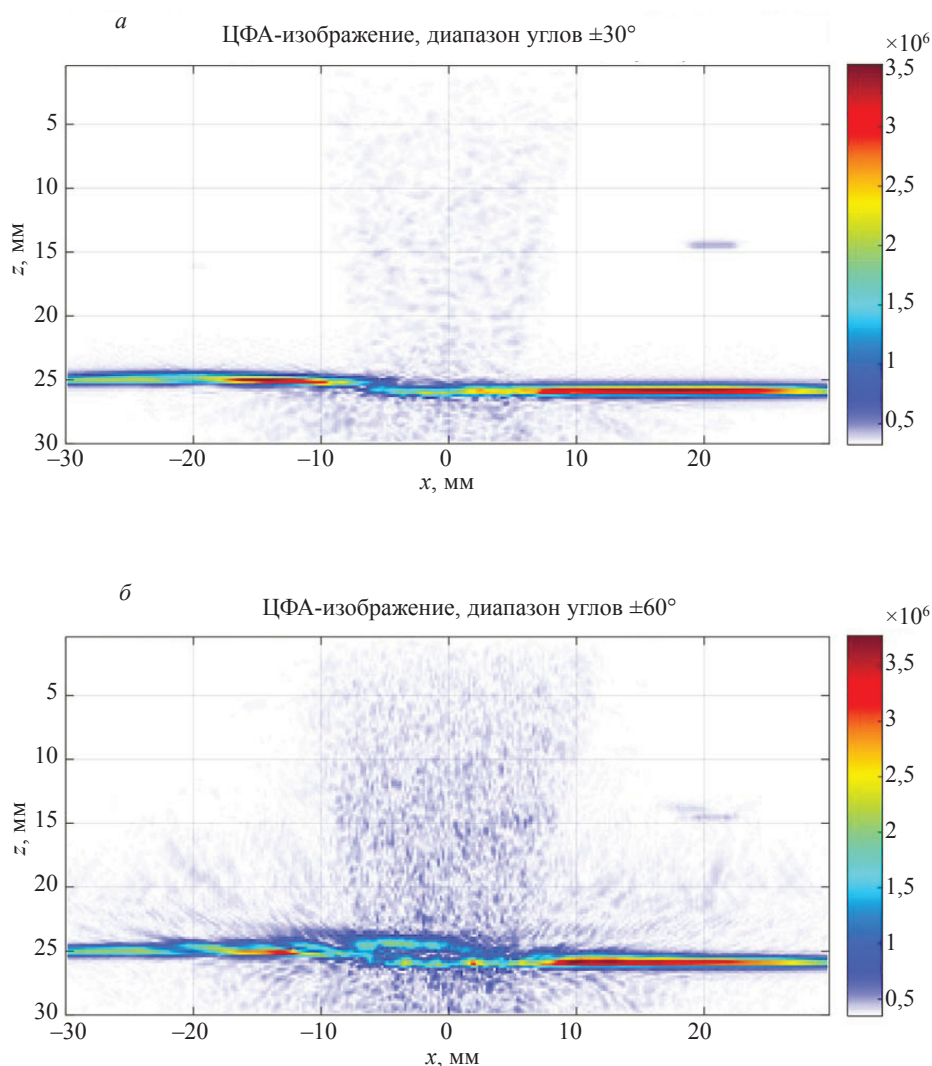


Рис. 10. Изображения отражателей в образце с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

скорости в основном металле слева и справа различаются, блик верхнего края трещины слева раздробился на три. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла по-прежнему обнаружить не удастся. Полученное ЦФА-изображение заметно хуже, чем рис. 9б, где можно уверенно обнаружить отражатели в основном металле (трещины 1 и 4) и определить их тип.

3.2.2. Скорость звука внутри модели трещины 3,6 мм/мкс (средний контраст)

На рис. 11а приведено поле скоростей образца с более контрастными трещинами, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс. Как и на рис. 9, обнаружить трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла достаточно сложно. На рис. 11б, в приведены изображения, полученные на первом и втором этапе MS-метода с использованием длин волн 3 и 1,2 мм. Положение трещин и их размеры определяются с точностью до четверти длины волны, и трещины хорошо различимы как в области основного металла, так и на границе основного и наплавленного металла. Скорость звука внутри трещин определяется с ошибкой около 1,5 мм/мкс.

На рис. 12а приведено изображение образца с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА в диапазоне углов ± 30 град. Из-за уменьшения волнового сопротивления материала в трещинах стал хорошо виден

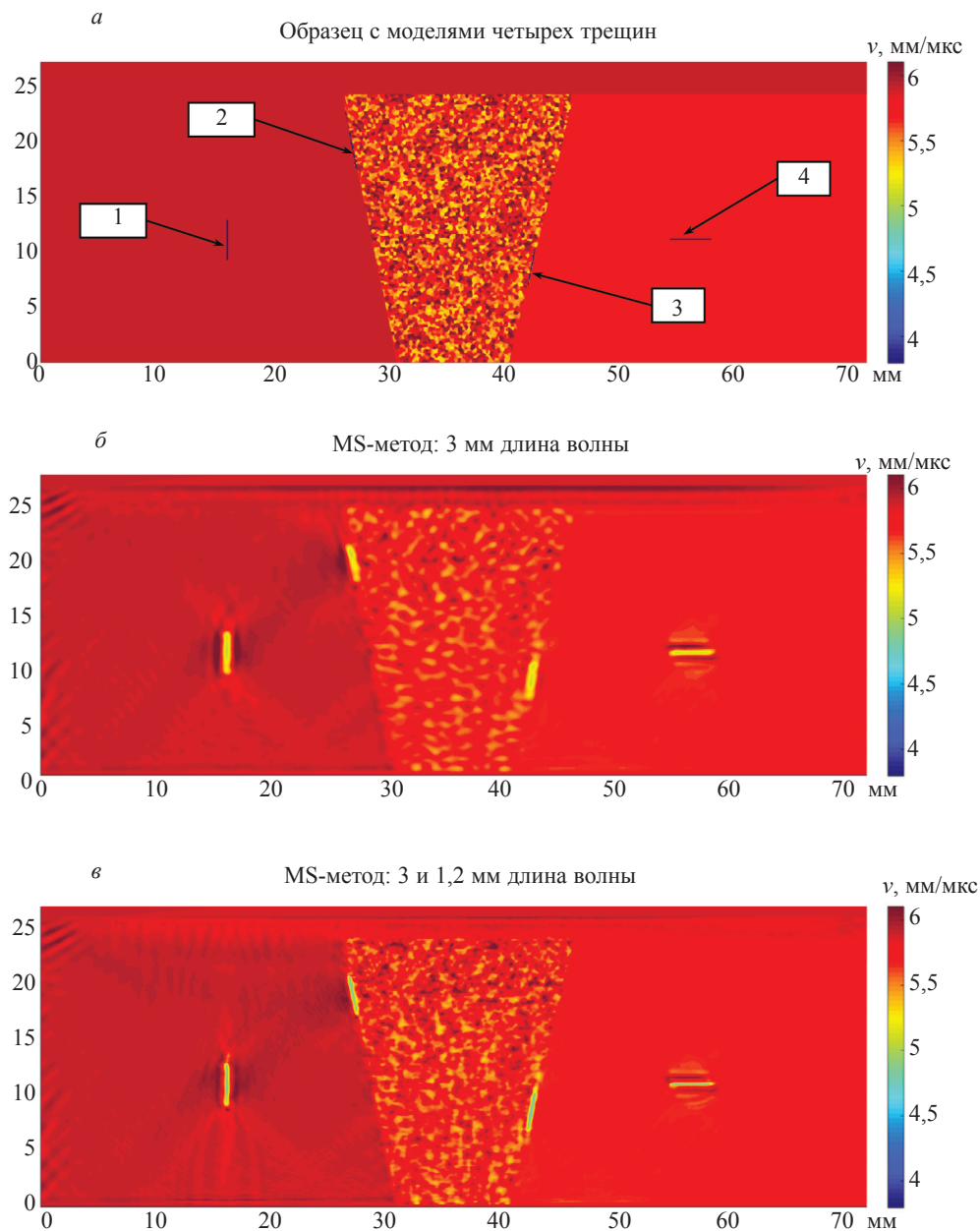


Рис. 11. Образец с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс (*a*). Поле скоростей, восстановленное MS-методом на первом (*б*) и втором (*в*) этапах с длинами волн 3 и 1,2 мм соответственно.

блик трещины 4, от трещины 1 остались только дифракционные блики краев, а трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла не видны совершенно. На рис. 12*б* изображение получено при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Возрос шум у дна образца, блик трещины 4 раздвоился из-за того, что скорости в основном металле слева и справа различаются, блик верхнего края трещины 1 слева раздробился на три. Трещины 2 и 3 обнаружить невозможно. Полученное изображение принципиально хуже приведенного на рис. 11*в*.

В случае наличия валика усиления над областью наплавленного металла невозможно провести измерения эхосигналов, расположив антенную решетку на поверхности образца. Для направления ультразвуковых волн в исследуемую область необходимо использовать призмы с меньшими, чем в металле скоростями звука. При подготовке статьи были проведены численные эксперименты, когда две антенные решетки были размещены на плексигласовых призмах с

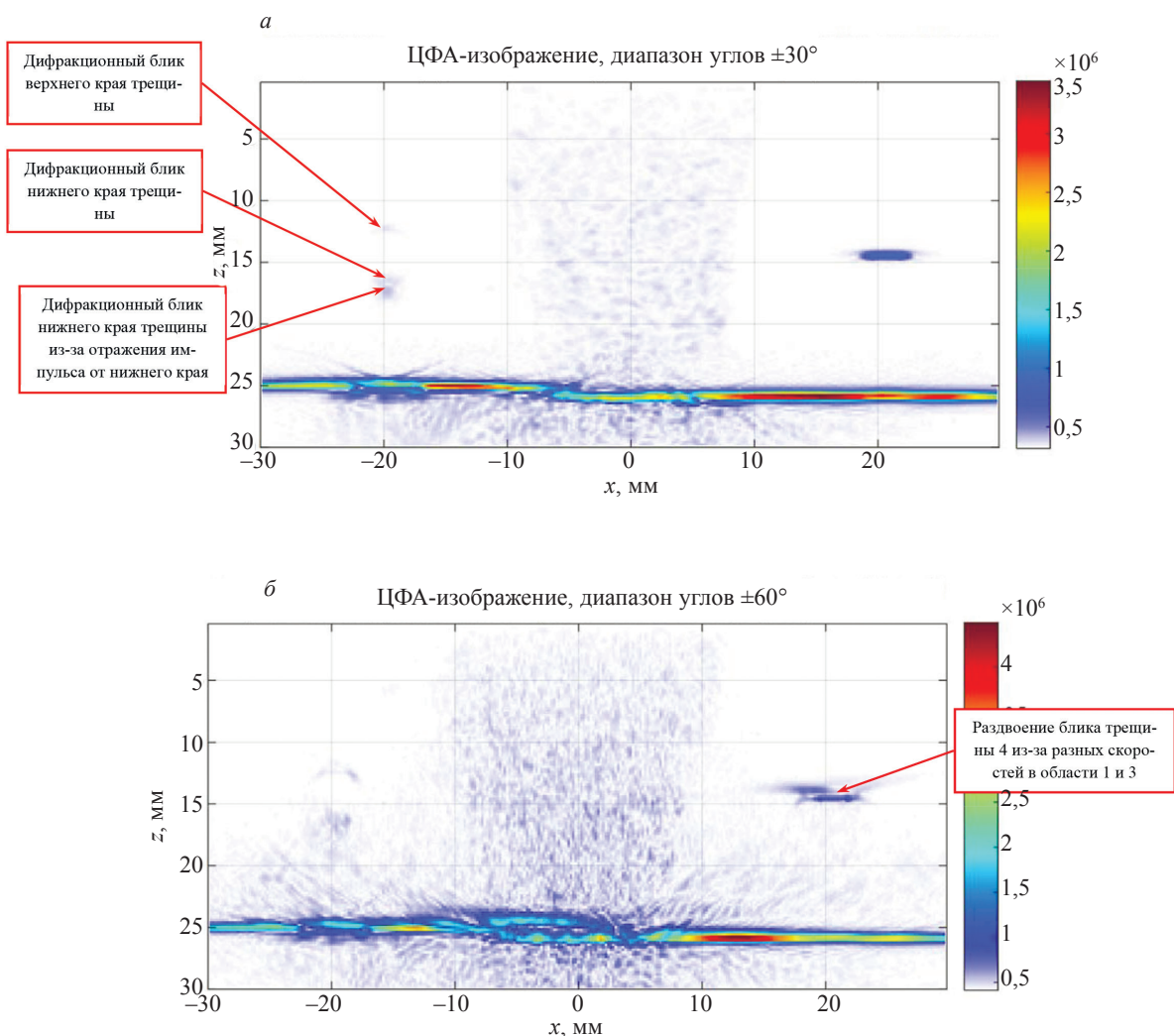


Рис. 12. Изображения отражателей в образце с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, реконструированное ЦФА методом: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а), в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

углом наклона 20 град и расположенные над областями 1 и 3 основного металла. Результаты восстановления поля скоростей MS-методом оказались достаточно близкими к тем, что представлены в разделах 3.1 и 3.2, и поэтому они в статье не приводятся.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

1. Томографический метод, основанный на решении обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения, показал более высокую устойчивость к структурному шуму по сравнению с методом ЦФА за счет учета перераспределения и восстановления изображения в виде поля скоростей.

2. При малом контрасте отражателей с материалом со скоростью звука, равной 5,1 мм/мкс, MS-метод позволяют не только определить форму отражателей (БЦО или трещина), но и оценить скорость звука в отражателях. В то же время метод ЦФА не позволяет обнаруживать низкоконтрастные отражатели на фоне структурных шумов.

3. При среднем контрасте отражателей с материалом со скоростью звука, равной 3,6 мм/мкс, результаты реконструкции внутренней структуры отражателей методами ультразвуковой томографии значительно превышают по эффективности метод ЦФА. Как показали модельные расчеты, диагностика высококонтрастных отражателей, в которых скорость звука составляет 1 мм/мкс и менее, с помощью методов ультразвуковой томографии приводит к определенным проблемам для MS-метода, связанным со сходимостью итерационного процесса к глобальному минимуму функционала невязки. Применение MS-метода в таких ситуациях требует дополнительных исследований.

4. Представляется актуальной разработка методов решения обратных задач ультразвуковой томографии в векторной модели. Решение прямой задачи принципиальных проблем не представляет, поскольку существуют хорошо разработанные методы для их реализации. Для решения обратной задачи нужно вывести аналитическую формулу для расчета градиента функционала невязки между измеренным и рассчитанным в прямой задаче волновым полем аналогично тому, как это делается в скалярной волновой модели. Эта задача, по мнению авторов, является очень важной и интересной не только с прикладной, но и с чисто математической точки зрения. По мнению авторов статьи, преимущества томографического подхода по сравнению с методом ЦФА при решении задач реконструкции изображения слабоконтрастных отражателей при наличии структурных шумов сохраняются и в векторной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 180 с.
2. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
3. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 51—61.
4. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: СФУ, 2011. 536 с.
5. Базулин Е.Г., Коновалов Д.А. Применение процедуры выбеливания эхосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 3—15.
6. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. № 1 (51). Март 2011. С. 64—70.
7. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Postprocessing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
9. Beilina L., Klibanov M.V., Kokurin M.Y. Adaptivity with relaxation for ill-posed problems and global convergence for a coefficient inverse problem // J. Math. Sci. 2010. V. 167. P. 279—325. DOI: 10.1007/s10958-010-9921-1
10. Natterer F. Possibilities and limitations of time domain wave equation imaging / In: Contemporary Mathematics. 2011. V. 559 (Providence: American Mathematical Society). P. 151—162.
11. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography // Inverse Probl. 2013. V. 29. P. 075004.
12. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. V. 74. P. WCC127—WCC152.
13. Marty P., Boehm C., Fichtner A. Acoustoelastic full-waveform inversion for transcranial ultrasound computed tomography // Proc. SPIE. Medical Imaging: Ultrasonic Imaging and Tomography. 2021. V. 11602. P. 1160211. <https://doi.org/10.1117/12.2581029>
14. Ruiter N.V., Zapf M., Hopp T., Gemmeke H., van Dongen K.W.A. USCT data challenge // Proc. SPIE. Medical Imaging: Ultrasonic Imaging and Tomography. 2017. V. 10139. P. 101391N. <https://doi.org/10.1117/12.2272593>
15. Tran K.T., Jalinoos F., Nguyen T.D., Agrawal A.K. Evaluation of Bridge Abutment with Ultraseismic Waveform Tomography: Field Data Application // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 95.
16. Seidl R., Rank E. Iterative time reversal based flaw identification // Computers & Mathematics with Applications. 2016. V. 72. P. 879—892.
17. Bazulin E., Goncharsky A., Romanov S., Seryozhnikov S. Ultrasound transmission and reflection tomography for nondestructive testing using experimental data // Ultrasonics. 2022. V. 124. P. 106765. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106765

18. *Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y.* Multistage Iterative Method to Tackle Inverse Problems of Wave Tomography // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2022. V. 9. P. 87—107.
 19. *Кокурин М.Ю.* О редукции нелинейной обратной задачи для гиперболического уравнения на плоскости к линейному интегральному уравнению // *Вычислительные методы и программирование*. 2009. № 3. С. 300—305.
 20. *Hamilton B., Bilbao S.* Fourth-order and optimised finite difference schemes for the 2-D wave equation / In: *Proc. of the 16th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-13)*. Springer. 2013. P. 363—395.
 21. *Kim K.H., Park Q.H.* Overlapping computation and communication of three-dimensional FDTD on a GPU cluster // *Comput. Phys. Commun.* 2012. V. 183. P. 2364—2369.
 22. *Labyed Y., Huang L.* Toward real-time bent-ray breast ultrasound tomography using GPUs / In: *Medical Imaging, Proc. of SPIE*. 2014. V. 9040. P. 90401N.
-