

Получение изображения дефектов методом SAFT с учётом переменной скорости звука в объекте контроля

Базулин Е.Г.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье предложена модификация метода SAFT для получения изображения дефектов в объектах контроля с тремя областями с разными скоростями звука. К таким объектам относятся сложные композитные сварные соединения, ремонтные заварки. В них скорость звука в сварном соединении может отличаться более чем на 5% от скорости в основном металле. Поэтому для получения качественного изображения дефектов нужно учитывать разные скорости звука. Для решения задачи предложен способ описания объекта контроля с тремя областями с разной скоростью звука. Расчёт задержек распространения ультразвукового импульса проводится с помощью принципа Ферма. Приведены результаты восстановления изображения дефектов в сварном соединении Ду300 по эхосигналам, полученным в результате численного моделирования методом конечных элементов. Изображения, полученные методом SAFT без учёта разных скоростей звука, смещаются от своего истинного положения, что не позволяет определить их координаты и местоположение. Учёт разных скоростей звука позволяет получать несмещённые блики изображений дефектов и, следовательно, точнее оценить тип и размеры дефектов.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, SAFT, переменная скорость звука, принцип Ферма.

1. Введение

В практике ультразвукового контроля (УЗК) встречаются объекты, в которых скорость звука может меняться на траектории распространения ультразвукового импульса. К таким объектам относятся сложные композитные сварные соединения, ремонтные заварки в трубопроводах Ду800, аустенитные сварные соединения в трубопроводах Ду300. В них скорость звука в сварном соединении может отличаться более чем на 5% от скорости в основном металле. Более того, само распределение скорости в аустенитных швах может

иметь сложный характер [1, 2]. Если это обстоятельство не учитывать в алгоритмах визуализации, то изображения дефектов будут получаться искажёнными. Это существенно затруднит или сделает невозможным решение задачи дефектометрии сварных соединений, то есть задачи определения реальных размеров дефектов и распознавания их типа по изображениям.

В настоящее время когерентные методы получения изображений дефектов являются наиболее информативными для получения информации о несплошностях объекта контроля. Один из наиболее распространенных когерентных вычислительных алгоритмов получения изображений дефектов – это фокусировка методом синтезированной апертуры (**Synthetic Aperture Focusing Technique – SAFT**). Этот метод достигает высокой разрешающей способности изображений за счет совместной обработки данных, накопленных на существенно большей, чем у обычного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) апертуре. В базовом случае метод SAFT реализуется с помощью совмещенного ПЭП с широкой диаграммой направленности, сканирующего по поверхности объекта [3, 4, 5] и постоянной скорости звука.

Решение задачи распространения звука в среде с переменной скоростью звука, подробно рассмотрено в гидроакустике [6, 7] и оптике [8]. Известны системы получения изображения несплошностей металлов, использующие метод SAFT учитывающий переменную скорость звука [9, 10]. Следует отметить работу [11], в которой для учёта распространения звука в неоднородной среде предложено использовать избыточный и не ортогональный полосчатый базис. Этот подход примечателен тем, что решение задачи сводится к решению множества простых задач для слоисто-неоднородной среды, что устраняет проблемы, связанные с решением задачи рефракции для областей с границами в виде ломаных линий.

В статье предложена модификация метода SAFT для получения изображения дефектов в объектах контроля с тремя областями с разными скоростями звука. Расчёт задержек распространения ультразвукового импульса проводится с помощью принципа Ферма. Приведены результаты восстановления изображения дефектов в сварном соединении Ду300 по эхосигналам, полученным в результате численного моделирования методом конечных элементов.

2. Метод SAFT для случая переменной скорости звука

В практике ультразвукового контроля обычно используется Борновское приближение, когда амплитуда рассеянного поля полагается много меньше амплитуды падающе-

го поля [12]. Это позволяет по измеренным в совмещённом режиме эхоимпульсам $p(\vec{r}_r, t)$ получить, оценку рассеивающего потенциала $\varepsilon(\vec{r})$ по следующей формуле

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_r, t) \delta(t - 2t_r(\vec{r}_r, \vec{r}) + t_{\max}) d\vec{r}_r dt, \quad (1)$$

где t_{\max} - время нарастания реального эхосигнала $p(t)$. Такой метод получения изображения дефектов далее будет традиционно называться SAFT. Для анализа нужно рассчитать огибающую функцию $\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i)$, которая в дальнейшем и будет называться изображением

$$I(\vec{r}_i) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) + i\mathfrak{A}(\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i))|$$

где \mathfrak{A} - построчное преобразование Гильберта.

Для того чтобы воспользоваться формулой (1), нужно определить путь распространения импульсов от места излучения и приёма до точки прицеливания $\vec{r} = (x, z)$. Для этого можно воспользоваться принципом Ферма [13], гласящим, что распространение света (звука) в пространстве со скоростью $c(x, z)$ из одной точки в другую проходит по траектории с минимальным временем пробега импульса. Этот подход позволяет учитывать такие обстоятельства, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля, трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред. Но для проведения расчётов траекторий нужно разработать формальное описание объекта контроля с областями с разными скоростями звука.

2.1. Описание объекта контроля

Введём в рассмотрение особую область S_1 , которая соответствует призме преобразователя (Рис. 1), в которой в точке $\vec{r}_i = (x_i, z_i) \in S_1$ находится излучатель или приёмник. Будем считать, что объект контроля можно представить в виде N_s областей $\{S_2, S_3, \dots, S_{N_s+1}\}$, для каждой из которых заданы продольная, поперечная скорости звука и плотность, далее обозначаемые как $c_{l,i}, c_{t,i}, \rho_i$. В данной работе будем рассматривать случай $N_s = 3$.

Границу $L_i = \{L_{i,1}, L_{i,2}, \dots, L_{i,N_L}\}$ области S_i будем описывать набором из N_L незамкнутых линий Безье (*Bézier*) [14]. Каждая линия может быть линейной или квадратичной кривой Безье, конец каждой линии $L_{i,n}$ совпадает с началом последующей $L_{i,n+1}$, за исключением начала первой линии и конца последней. Такой подход к описанию границы областей S_i позволяет решить задачу для прямого луча, и не позволяет решить задачу с учётом

отражения импульса от неровного дна объекта контроля. Линейная кривая Безье, соединяющая точку (x_{start}, z_{start}) с точкой (x_{end}, z_{end}) , описывается следующими формулами

$$\begin{aligned} x(s) &= B(s, 1) = x_{start} + (x_{end} - x_{start})s \\ z(s) &= B(s, 1) = z_{start} + (z_{end} - z_{start})s \end{aligned} \quad (2)$$

где $s \in [0, 1]$. Квадратичная кривая Безье, соединяющая точку (x_{start}, z_{start}) с точкой (x_{end}, z_{end}) с дополнительной точкой (x_0, z_0) , определяется так

$$\begin{aligned} x(s) &= B(s, 2) = x_{start} + 2(x_0 - x_{start})s + (x_{start} - 2x_0 + x_{end})s^2 \\ z(s) &= B(s, 2) = z_{start} + 2(z_0 - z_{start})s + (z_{start} - 2z_0 + z_{end})s^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, точка преломления на линии $L_{i,n}$ задаётся точками $(x_{i,n,start}, z_{i,n,start})$ и $(x_{i,n,end}, z_{i,n,end})$ и параметром $s_{i,n}$. Для квадратичных кривых Безье задается ещё одной дополнительной точкой $(x_{i,n,0}, z_{i,n,0})$.

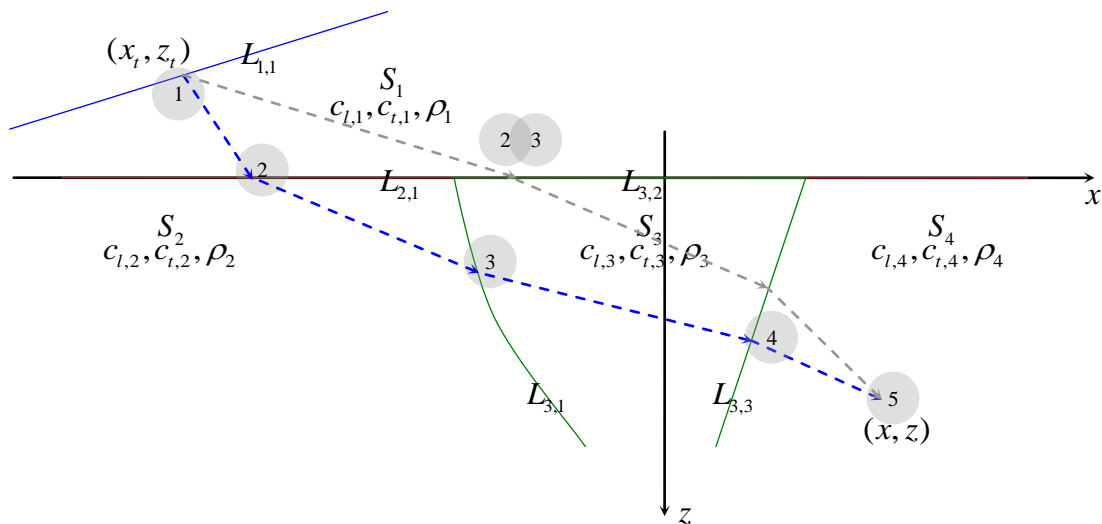


Рис. 1 Схема объекта контроля со сварным соединением.

В зависимости от того, в какой области находится точка «прицеливания» траектория будет задаваться списком длиной N_b с именем b из номеров линий, пересекаемых траекторией. Так, если $\vec{r} = (x, z) \in S_4$, то список имеет вид $b = \{2, 3, 3\}$ (синие пунктирные стрелки на Рис. 1), то есть луч дважды пересекает линию номер 3, а если $\vec{r} = (x, z) \in S_2$ то $b = \{2\}$ и задача сводится к преломлению на поверхности образца. Точки преломления или отражения имеют координаты $\vec{r}_{b,n} = (x_b(s_n), z_b(s_n))$. Полностью траекторию луча можно задать $N_b + 2$ точками $\vec{r}_n = (x_n, z_n)$

$$\{\tilde{x}_n\} = \{x_t, x_b(s_1), x_b(s_2), \dots, x_b(s_{N_b}), x\},$$

$$\{\tilde{z}_n\} = \{z_t, z_b(s_1), z_b(s_2), \dots, z_b(s_{N_b}), z\}.$$

Скорость распространения импульса вдоль трассы задаётся списком $\{c_1, c_2, \dots, c_{N_b}\}$.

Первым элементом всегда идет скорость звука в призме $c_1 = c_{pr}$, а остальные элементы списка скорости могут содержать любые сочетания из продольной c_l и поперечной c_t скорости звука. Далее в расчетах будем полагать, что в объекте распространяется поперечная волна.

Время распространения импульса по лучу от точки расположения излучателя $\vec{r}_t = (x_t, z_t)$ до точки прицеливания $\vec{r} = (x, z)$ можно рассчитать по формуле

$$t(\vec{r}_t, \vec{r}) = \sum_{n=1}^{N_b+1} t_n = \sum_{n=1}^{N_b+1} \frac{|\vec{r}_n - \vec{r}_{n+1}|}{c_n} = \sum_{n=1}^{N_b+1} \frac{\sqrt{(\tilde{x}_n - \tilde{x}_{n+1})^2 + (\tilde{z}_n - \tilde{z}_{n+1})^2}}{c_n}. \quad (4)$$

На Рис. 1 изображён объект контроля тремя областями S_2 , S_3 и S_4 с разными скоростями звука и плотностями. Поверхность образца описывается одной прямой линией $L_2 = \{L_{2,1}\}$, отмеченной красным цветом, а граница шва, отмеченная зелёным цветом, определяется линией $L_3 = \{L_{3,1}, L_{3,2}, L_{3,3}\}$, из которых $L_{3,1}$ кривая Безье второго порядка. Траектория распространения импульса для случая принадлежности точки «прицеливания» области S_4 состоит из пяти линий, отмеченных синими пунктирными стрелками на Рис. 1, и будет определяться пятью точками, которые на рисунке пронумерованы цифрами на серых кругах. Для точки «прицеливания» принадлежащей области S_3 список имеет вид $b = \{2, 3\}$. Такой подход позволяет, оставаясь в рамках одного описания, рассматривать случай, когда луч преломляется дважды, и ситуацию когда луч преломляется только на поверхности образца, то есть точка 2 и 3 совпадают (Рис. 1).

Нахождение нужной траектории заключается в решении задачи минимизации функции $t(\vec{r}_t, \vec{r}) = t_{opt}(s_1, s_2, \dots, s_{N_b})$, имеющей N_b переменных. В качестве начального приближения N_b параметров s_n задаются середины линий L_i .

Подход к решению задачи поиска минимума функции нескольких переменных, основан на применении итерационной процедуры и требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому для получения изображения дефектов на обычных персональных компьютерах требуется много времени. Но в силу того, что расчёт каждой точки изображения можно проводить независимо друг от друга, алгоритм (1) и алгоритм расчёта задержек $t_t(\vec{r}_t, \vec{r})$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r})$ могут быть запрограммированы на специальных вычислительных

устройствах для параллельных вычислений, например, на графических платах с технологией CUDA [15].

Модель, построенная на расчёте времени задержки при оптимизации выражения по неизменяемому числу переменных N_b , обладает рядом важных ограничений. Во-первых, каждая линия может пересекаться траекторией только один раз, во-вторых, нельзя при расчёте задержек отказываться от старой области, перескакивать на новую область или включать в траекторию ещё одну область. Очень важный момент состоит и в том, что количество решений в общем случае может быть уже несколько. На Рис. 1 схематически пунктирной линией серого цвета показана ещё одна траектория, доставляющая локальный или глобальный минимум выражению (4). Для этой траектории точки, отмеченные цифрами 2 и 3, слились в одну точку. Это приведёт к усложнению процедуры поиска минимума, так как для каждого положения излучателя придётся испытывать несколько моделей с разными начальными приближениями.

2.2. Градиент функции расчёта времени задержки

Для более быстрых модификаций поиска экстремума функций многих переменных нужно рассчитать градиент функции $t(\vec{r}_l, \vec{r})$ по формуле (4) для расчёта времени задержки на трассе. Так как функция $t(\vec{r}_l, \vec{r}) = t_{opt}(s_1, s_2, \dots, s_{N_b})$ имеет N_b переменных $\{s_1, s_2, \dots, s_{N_b}\}$, которые параметрическим образом определяют координаты $(x_b(s), z_b(s))$, то

частные производные $\frac{\partial t(\vec{r}_l, \vec{r})}{\partial s_n}$ можно рассчитать по формулам

$$\frac{\partial t(\vec{r}_l, \vec{r})}{\partial s_n} = \frac{(\tilde{x}_n - \tilde{x}_{n+1})\Delta x_n + (\tilde{z}_n - \tilde{z}_{n+1})\Delta z_n}{r_n c_n} - \frac{(\tilde{x}_{n+1} - \tilde{x}_{n+2})\Delta x_n + (\tilde{z}_{n+1} - \tilde{z}_{n+2})\Delta z_n}{r_{n+1} c_{n+1}},$$

где $r_n = \sqrt{(\tilde{x}_n - \tilde{x}_{n+1})^2 + (\tilde{z}_n - \tilde{z}_{n+1})^2}$,

для квадратичных кривых Безье

$$\Delta x_n = (1 - \tilde{s}_n)(x_{start,n} - x_{0,n}) + \tilde{s}_n(x_{0,n} - x_{end,n}),$$

$$\Delta z_n = (1 - \tilde{s}_n)(z_{start,n} - z_{0,n}) + \tilde{s}_n(z_{0,n} - z_{end,n}),$$

$$\tilde{s}_n = s_n - n,$$

а для линейных кривых Безье

$$\Delta x_n = z_{start,n} - z_{end,n}, \quad \Delta z_n = z_{start,n} - z_{end,n}.$$

3. Численные эксперименты

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведён численный эксперимент. В результате были рассчитаны эхосигналы, отраженные от отверстий в объекте состоящим из областей с разными скоростями звука. Модельные расчёты проводились методом конечных элементов [16] в скалярном варианте. То обстоятельство, что эхосигналы были рассчитаны методом конечных элементов, а изображение восстановлено методом SAFT, позволяет с *большой* достоверностью убедиться в правильной работе алгоритма и протестировать программу.

В практике УЗК аустенитных сварных соединений Ду300 встречаются ситуации, когда к сварному соединению доступ возможен только с одной стороны. Высокое затухание в аустените и скорость звука, заметно отличающаяся от скорости звука в основном металле, затрудняют не только определение через шов типа дефекта и его размеры, но и просто его обнаружение. Поэтому для моделирования был синтезирован низкочастотный наклонный преобразователь на частоте 1 МГц. Угол наклона призмы был равен 45 градусам, скорость звука в призме полагалась равной 2.33 мм/мкс. Вид разделки сварного соединения Ду300 представлен на Рис. 2 слева. Скорость звука в основном металле полагалась равной 3.2 мм/мкс, а в сварном соединении 2.8 мм/мкс. На Рис. 2 справа представлен вид эхосигнала и его спектр.

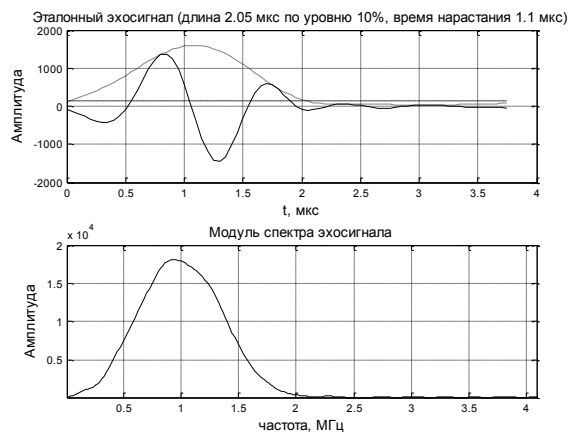
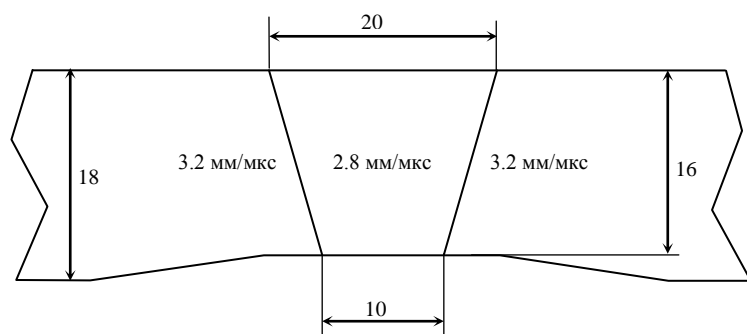


Рис. 2 Геометрия шва и сварного соединения Ду300 с указанием скоростей (слева). Вид эхосигнала и его спектра (справа).

3.1. Три отверстия диаметром 1 мм

Дефекты в виде трёх отверстий диаметром 1 мм располагались на глубине 13 мм, на расстоянии 10 мм до центра шва, в центре шва и на расстоянии 10 мм за

центром шва. На Рис. 3 в растровом виде представлены рассчитанные эхосигналы при сканировании по оси x по 234 точкам с шагом 0.3 мм.

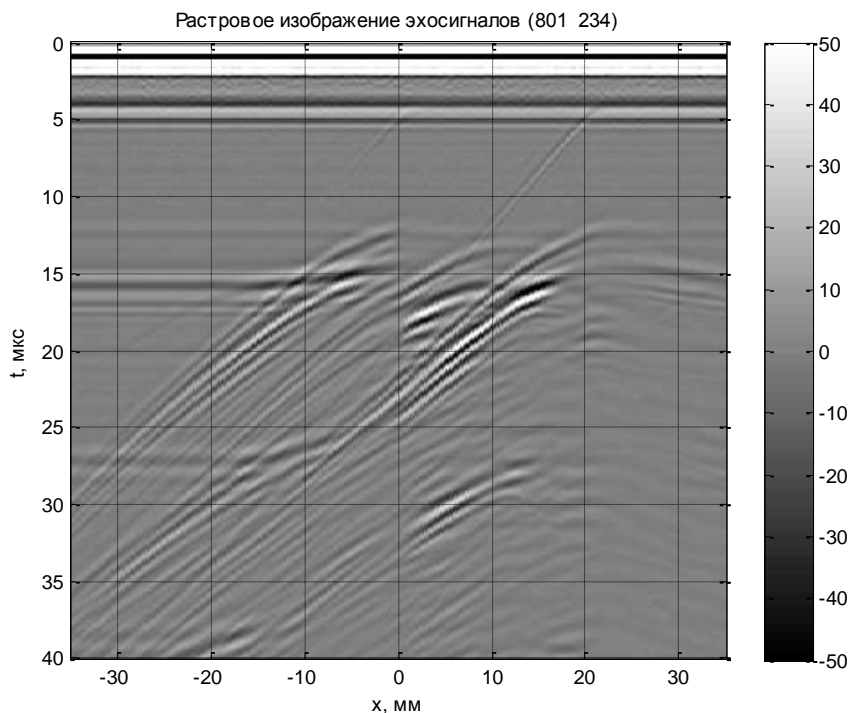
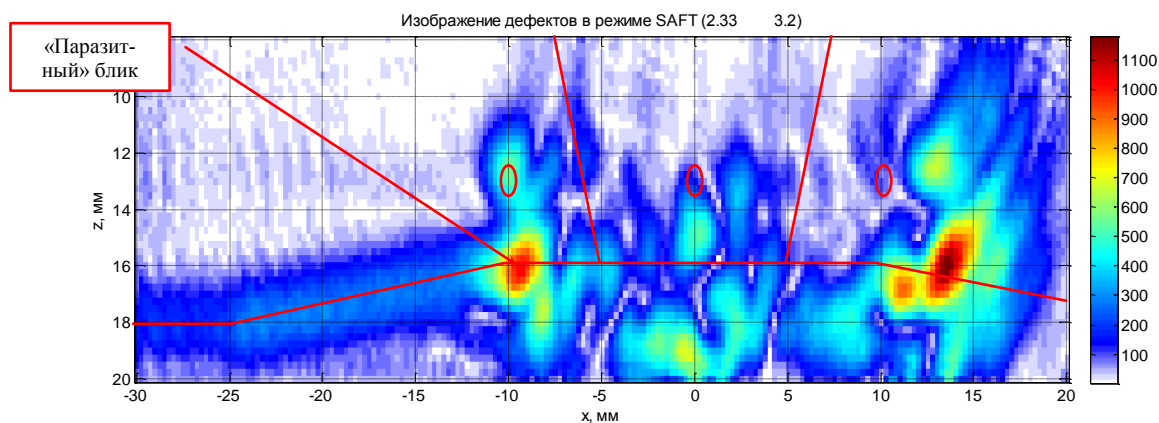


Рис. 3. Эхосигналы, отражённые от трёх отверстий диаметром 1 мм.

На Рис. 4 сверху представлено изображение, полученное методом SAFT без учёта разных скоростей, а внизу - с учётом наличия трёх областей с разными скоростями звука. На рисунок наброшена маска красного цвета с контурами отверстий и нижней границы образца. Без учёта разных скоростей изображение отверстия в центре шва сместилось вниз на 2 мм, и изображение за швом сместилось вверх на 1 мм и вправо на 3 мм. И только на изображении, полученном после учёта разных скоростей, координаты дефектов определяются с точностью не меньше, чем половина длины волны.



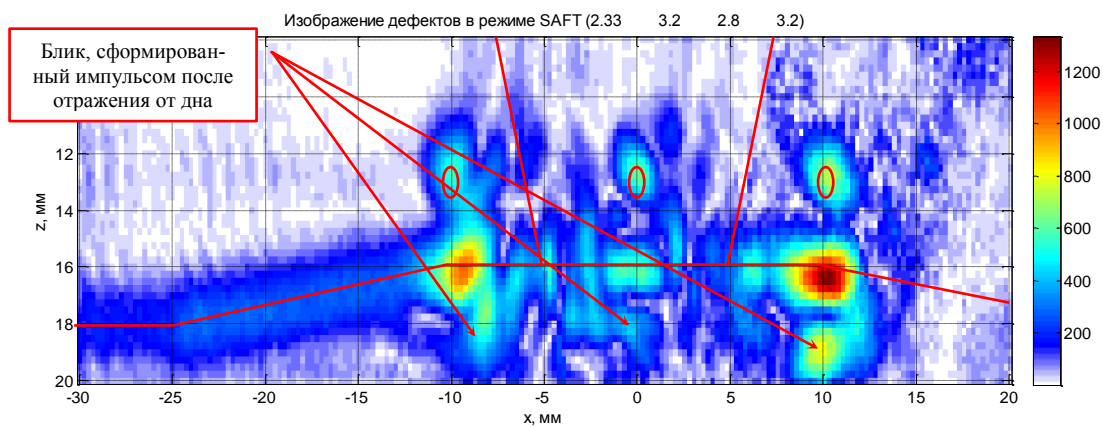
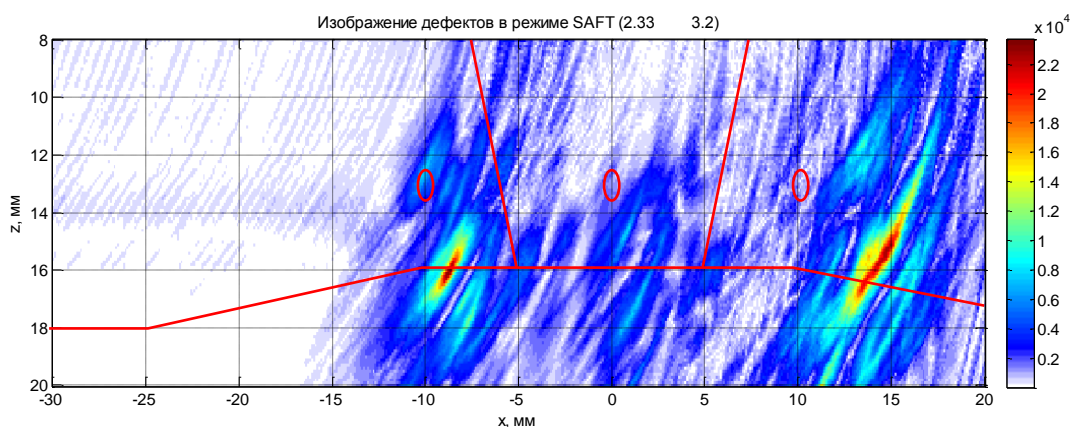


Рис. 4. Изображение трёх отверстий диаметром 2 мм без учёта разных скоростей звука (вверху) и с учётом разных скоростей звука (внизу).

Работа преобразователя в совмещённом режиме и применение метода SAFT привело к появлению «паразитных» бликов расположенных практически точно под бликами отверстий. Эти блики сформированы эхосигналами, распространяющимися до дефекта по прямому лучу, а обратно с однократным отражением от неровного дна. Их амплитуда значительно уменьшается при регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования и восстановлении изображения методом C-SAFT. Блики, сформированные на отражённом луче, размыты и расположены не зеркально относительно дна образца из-за отражения от неровного дна [17].

Низкая частота привела к невысокому продольному разрешению изображения, которое можно повысить, проведя деконволюцию эхосигналов с помощью метода максимальной энтропии [18], используя в качестве эталона эхосигнал изображённый на Рис. 2 справа. На Рис. 5 вверху представлено изображение, полученное методом SAFT без учёта разных скоростей, а внизу с учётом наличия трёх областей с разными скоростями звука. На рисунок наброшена маска красного цвета с контурами отверстий и нижней границы образца. Продольная разрешающая способность возросла примерно в три раза, в сравнении с изображением на Рис. 4.



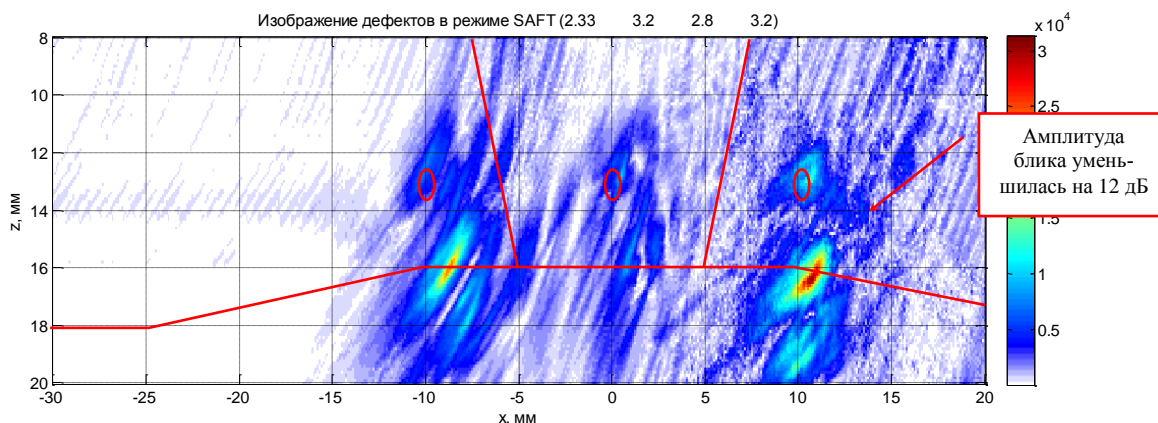


Рис. 5. Изображение трёх отверстий диаметром 2 мм после деконовлюции эхосигналов методом максимальной энтропии - на верхней панели без учёта разных скоростей звука, а на нижней с учётом разных скоростей звука.

3.2. Два отверстия диаметром 2 мм

Вид разделки сварного соединения Ду300 и скорости звука такие же, что и в предыдущем численном эксперименте. Дефекты в виде двух отверстий диаметром 2 мм располагались в центре сварного соединения на глубине 8 и 13 мм. На Рис. 6 слева представлено изображение, полученное методом SAFT без учёта разных скоростей, а справа с учётом наличия двух областей с разными скоростями звука. На рисунок наброшена маска красного цвета с контурами отверстий. Без учёта разных скоростей изображение отверстия в центре шва сместилось вниз на 2 мм и вправо на 1 мм. Форма блика дефекта искажилась из-за появления «хвостов». И только на изображении, полученном после учёта разных скоростей, блики дефектов встали на свои места и их координаты определяются с точностью не меньше, чем половина длины волны.

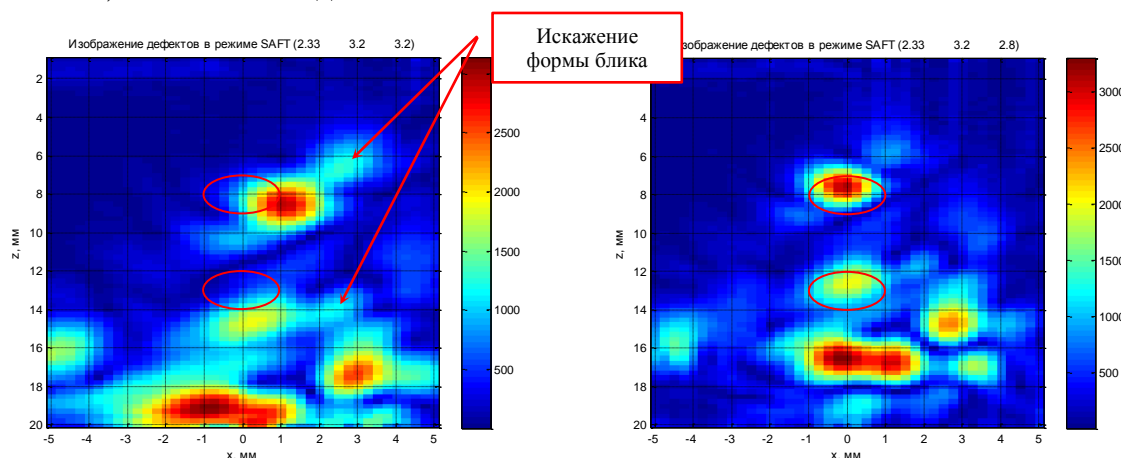


Рис. 6 Изображение двух отверстий диаметром 2 мм.

4. Выводы

Таким образом, на основании изложенного материала можно сформулировать следующие выводы.

- Предложена модификация метода SAFT, позволяющая учитывать наличие в объекте контроля нескольких областей с разной скоростью звука. С его помощью можно получать изображения дефектов в объектах контроля с композитными швами, с ремонтными заварками без смещения бликов.
- Предложенный способ расчёта времени пробега ультразвукового импульса вдоль траектории с переменной скоростью звука может применяться и для получения изображения дефектов методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования с помощью антенной решётки.
- Более качественные изображения позволят построить надёжную систему автоматизированного контроля с распознаванием типа дефектов и определения их размеров. Дальнейшее развитие данного подхода позволит использовать более сложные модели распределения скорости звука в сварном соединении и позволит изображения с учётом отражения от границ объекта контроля.

Следует отметить очень важное обстоятельство. Для эффективного применения предложенного алгоритма учёта разных скоростей звука нужно предварительно получить информацию как о форме области с иной скоростью звука, например, в заварке, так и о скоростях звука в основном металле и в заварке. Информацию о форме границы области с иной скоростью звука можно получить по изображениям, полученным простым методом SAFT по эхосигналам, измеренным преобразователем на частоте 5 МГц. А вот получение информации о скорости звука в заварке и основном металле является существенно более сложной задачей.

Автор выражает благодарность Голубеву А.В. за помощь в проведении численных экспериментов методом конечных элементов.

5. Список литературы

- 1 Ogilvi I.A. Ultrasonics beam profiles and beam propogation in austenitic weld using a theoretical ray tracing model. – Ultrasonics, 1986, №11 , p. 337-347.
- 2 Алёшин Н.П., Горная С.П. Новый подход к оптимизации УЗК аустенитных сварных соединений. – В мире неразрушающего контроля, 2003, №1 (19), с. 16-18
3. Thomson, R.N. A Portable System for High Resolution Ultrasonic Imaging on Site. - British Journal of Non-Destructive Testing. - 1984, Vol. 26, № 7, pp. 281-285.
4. Johnson, J.A, Barna, B.A. The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging. - IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. - 1983, Vol. 30, Issue 5, pp. 283-294.
5. Плис А.И., Бабин М.В., Железняков В.А. К вопросу о прямом восстановлении пространственной структуры акустических источников. - Письма в ЖТФ, 1981, Т. 8, №2, с. 83-86.
- 6 Акустика океана. /Под ред. Л.М.Бреховских. - М.: Наука, 1974. 693 с.
- 7 Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография /Под ред. Ю.Ю. Житковского. М.: Мир, 1980. с. 219.
- 8 Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980, с. 304
- 9 Marklein R., Langenberg K. J., Mayer K., Miao J., Shlivinski A., Zimmer A., Muller W., Schmitz V., Kohl C., Mletzko U. Recent Applications and Advances of Numerical Modeling and Wavefield Inversion in Nondestructive Testing. - Advances in Radio Science, 2005, №3, p. 167–174
- 10 Shlivinski A., Langenberg K.J. Defect imaging with elastic waves in inhomogeneous-anisotropic materials with composite geometries. - Ultrasonics, 2007, vol. 46, № 1, p. 89-104
- 11 Буров В.А, Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Роль выбора базисных функций в задачах акустической томографии океана. - Акустический журнал, 2007, том 53, № 6, с. 791-808
- 12 Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
- 13 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
- 14 Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
- 15 Технология NVIDIA CUDA™, http://www.nvidia.ru/object/cuda_what_is_ru.htmlCUDA
- 16 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., Мир, 1975, 541 с.

-
- 17 Базулин Е.Г. Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Перспективы применения антенных решёток для автоматизированного ультразвукового контроля. - В мире неразрушающего контроля, 2010, №3(49) (в печати).
- 18 Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле. - Акустический журнал, 2009, том 55, №6, с. 772-783