

АНАЛИЗ ФАЗЫ ЦФА-ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ОБНАРУЖЕННОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

© 2019 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.Х. Вовилкин¹, Н.И. Сухоруков¹, Д.С. Тихонов¹

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,
Технопарк «Строгино»

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 09.01.2019; после доработки 17.04.2019

Принята к публикации 22.04.2019

В ультразвуковой дефектоскопии разработаны методы регистрации и анализа эхосигналов для определения типа отражателя и его размеров. Метод TOFD позволяет по фазе эхосигналов отличать трещину от объемного отражателя и с высокой точностью определять ее высоту. Но при наличии шума на его фоне выделить полезный сигнал может оказаться сложно. Кроме того, в методе TOFD без сканирования поперек сварного соединения невозможно определить смещение отражателя от центра шва. Метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) позволяет получать изображения высокого качества во всем объеме сварного соединения, но обычно анализируется только амплитуда ЦФА-изображения, не принимая во внимание его фазу. В данной работе используются сильные стороны этих методов при анализе изображения отражателей, что позволяет с большей достоверностью определять тип отражателя и его координаты при наличии шума. Численные и модельные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровая фокусировка антенной решеткой (ЦФА), Time of Flight Diffraction (TOFD).

DOI: 10.1134/S0130308219070030

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) промышленных объектов является задача определения типа отражателя и его размеров. Один из способов решения этой задачи — получение высококачественного изображения всей границы отражателя по эхосигналам, измеренным антенной решеткой методом цифровой фокусировки изображения (ЦФА) [1]. В этом случае определение типа отражателя, его размеров и координат залегания является достаточно простой задачей. Однако получить такое высококачественное изображение можно либо в случае всестороннего доступа к месту его залегания, либо при доступе к нему слева и справа с поверхности объекта контроля и использовании множества ЦФА-изображений, полученных с учетом отражения от границ объекта контроля [2]. Но если форма дна неизвестна или дно изъязвлено коррозией и амплитуда отраженных эхосигналов мала, или же к области залегания возможен доступ только с одной стороны, то решение задачи определения типа отражателя становится нетривиальной.

Метод ЦФА, хотя и позволяет получать изображения отражателей с высоким разрешением во всей области восстановления изображения (ОВИ), имеет два серьезных недостатка. Первый состоит в том, что измеренные эхосигналы, отраженные от реальной несплошности, которая может быть как объемным отражателем, так и трещиной, коррелируются с эхосигналами от точечного отражателя. То есть при восстановлении ЦФА-изображения полностью игнорируются особенности рассеивания поля на отражателе заданного типа. Второй недостаток метода ЦФА связан с тем, что корректное восстановление изображения отражателя невозможно, так как для расчета рассеянного поля нужно знать форму и акустические свойства отражателя. А они как раз и неизвестны!

В статье [3] для определения типа, размера и координат отражателя предложен метод, названный корреляционной дефектометрией. Он основан на расчете поля от отражателей разного типа и заданных размеров. В этом случае можно учесть эффект возникновения импульсов волны обегания-соскальзывания и учесть особенности рассеивания волны на краях трещины. Тот отражатель, для которого рассчитанное рассеянное поле максимально похоже на измеренное, и дает ответ на вопрос о типе и размерах отражателя. Но такой подход требует проведения большого объема вычислений.

В 1970-х гг. для контроля сварных соединений объектов атомной энергетики был разработан метод Time of Flight Diffraction (TOFD) [4]. Неоспоримым достоинством TOFD являются: высокая скорость проведения контроля на продольной волне двумя пьезопреобразователями перемещающимися вдоль сварного соединения (перпендикулярное сканирование), малый объем измеренных эхосигналов и высокая точность порядка $\pm 0,1$ мм определения высоты трещины. А возможность

проанализировать фазу рассеянных импульсов позволяет дать ответ на вопрос о типе обнаруженного отражателя. Метод TOFD имеет и недостатки: при наличии шума обнаружить эхосигналы и определить их фазы становится проблематичным, невозможно локализовать отражатель в направлении, поперечном сварному соединению. Для этого нужно провести дополнительные измерения со сканированием преобразователями поперек сварного соединения (параллельное сканирование) и восстановить изображение отражателей методом Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) [5], что уменьшает скорость проведения контроля и усложняет конструкцию сканирующего устройства.

Метод ЦФА восстанавливает изображение в комплексном формате, что позволяет анализировать не только амплитуду изображения отражателей с высоким отношением сигнал/шум, но и фазу изображения. Анализ фазы интересующих нас областей восстановленного ЦФА-изображения, по аналогии с методом TOFD, должен помочь сделать обоснованное заключение о типе обнаруженного отражателя.

2. ОСОБЕННОСТИ РАССЕИВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Рассмотрим характерные особенности рассеивания ультразвуковой волны на моделях наиболее распространенных типов дефектов: цилиндрический отражатель — объемный дефект и трещина — плоскостной дефект.

2.1. Цилиндрический отражатель

Аналитическое решение задачи рассеивания плоской гармонической ультразвуковой волны на цилиндре с акустически мягкой границей приведено в [6], а для произвольной границы — в [7]. Просуммировав решения гармонической задачи [6] для заданного частотного диапазона, можно перейти к анализу рассеивания в импульсном режиме. На рис. 1 выносками схематично показаны схемы образования волны обегания—соскальзывания: линии красного цвета соответствуют поперечной волне, зеленого — продольной, синий — рэлеевской. На рис. 1а представлен результат расчета эхосигнала поперечной волны, рассеянного в обратном направлении, при падении импульса поперечной волны с центральной частотой 5 МГц на боковой цилиндрический отражатель диаметром 6 мм. Хорошо виден импульс, отраженный от поверхности цилиндра, первый импульс, сформированный волной обегания рэлеевского типа, и второй импульс малой амплитуды при повторном обегании рэлеевской волны поверхности цилиндра. Фазы отраженного сигнала и импульса обегания-соскальзывания находятся в противофазе, отношение амплитуд около 16 дБ. При наблюдении под другими углами рассеивания импульс обегания-соскальзывания раздваивается, так как волны Рэля пробегают разное расстояние по поверхности цилиндра, двигаясь по и против часовой стрелки. На рис. 1б показан эхосигнал продольной волны при рассеянии на цилиндре импульса продольной волны. Амплитуда импульса обегания-соскальзывания продольной волны по поверхности цилиндра существенно меньше импульса, отраженного от границы отверстия. Отношение амплитуд этих импульсов около 46 дБ.

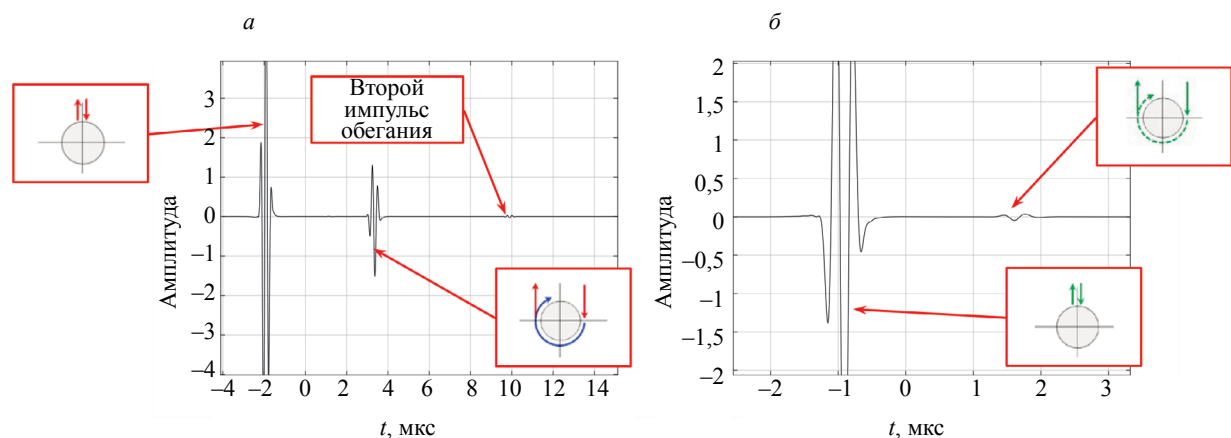


Рис. 1. Эхосигналы, рассеянные боковым цилиндрическим отражателем диаметром 6 мм в обратном направлении: при падении поперечной волны (а) и при падении продольной (б).

2.2. Плоскостной отражатель

Геометрическая теория дифракции позволяет рассчитать коэффициенты дифракции $D^{\alpha,\beta}$ на краях трещины как функции углов падения плоской волны и наблюдения рассеянного поля в трехмерном однородном изотропном пространстве [8, 9]. Верхние индексы α, β обозначают типы падающей и рассеянной волн и могут принимать значения: L — продольная волна, SV и SH — поперечная волна вертикальной и горизонтальной поляризации. Направление падающей волны по отношению к краю трещины определяется двумя углами $(\varphi_{xy}^\alpha, \varphi_{xz}^\alpha)$. Так же двумя углами $(\theta_{xy}^\beta, \theta_{xz}^\beta)$ определяется направление наблюдения. Для простоты рассмотрим вариант падения волны и ее наблюдения только в плоскости xz , при $\varphi_{xy}^\alpha = \theta_{xy}^\beta = 90^\circ$. На рис. 2 толстой линией черного цвета показана полубесконечная трещина, стрелкой красного цвета показано направление падающей под углом φ_{xz}^α плоской волны, стрелкой оранжевого цвета показано направление наблюдения дифрагированного поля θ_{xz}^β , пунктирной стрелкой красного цвета показано направление распространения отраженной под углом $\theta_{xz,GE}^\beta$ волны в приближении геометрической эластодинамики. Приведенная на рис. 2 конфигурация соответствует ситуации рассеяния поля на верхнем крае трещины и наблюдении в направлении к излучателю.

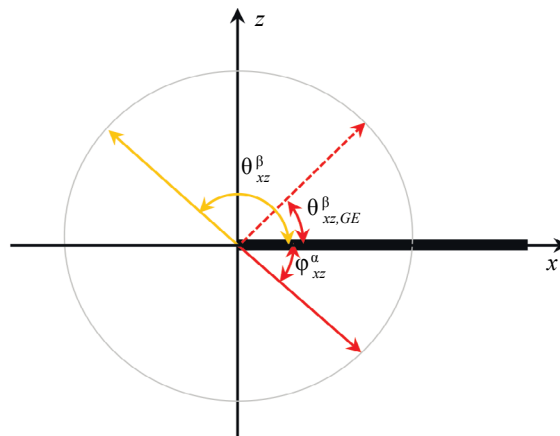


Рис. 2. К дифракции на краю трещины (случай $\varphi_{xy}^\alpha = \theta_{xy}^\beta = 90^\circ$, падение на верхний край).

На рис. 3 и 4 показана зависимость от угла наблюдения амплитуды (a) и фазы (δ) коэффициента рассеяния $D^{SV,SV}$ на верхнем и нижнем краях трещины при падении плоской волны.

Вертикальной линией красного цвета отмечен угол приема θ_{xz}^{SV} . Видно, что эхосигналы, рассеянные краями трещины, распространяющиеся в направлении приема, находятся в противо-

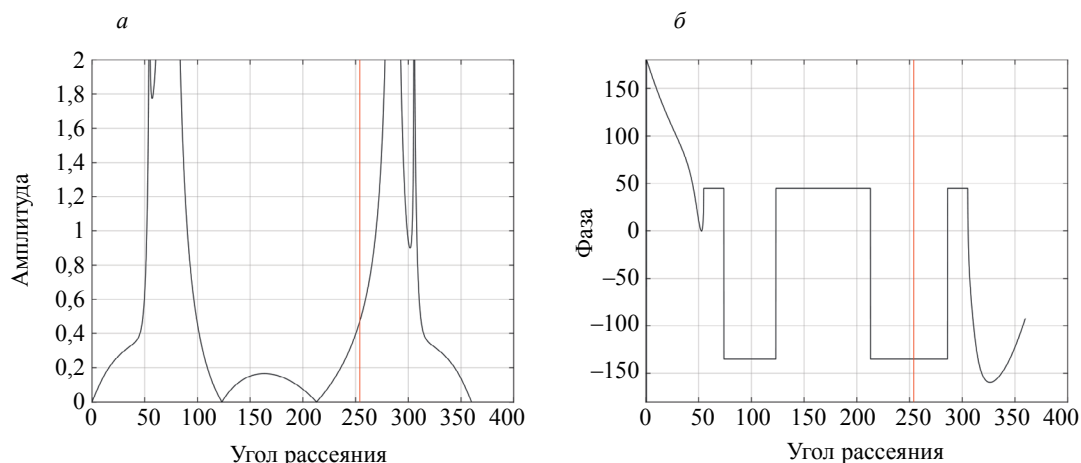


Рис. 3. Зависимость от угла наблюдения амплитуды (a) и фазы (δ) коэффициента рассеяния на верхнем крае трещины при падении поперечной волны ($\varphi_{xz}^{SV} = 74$ град).

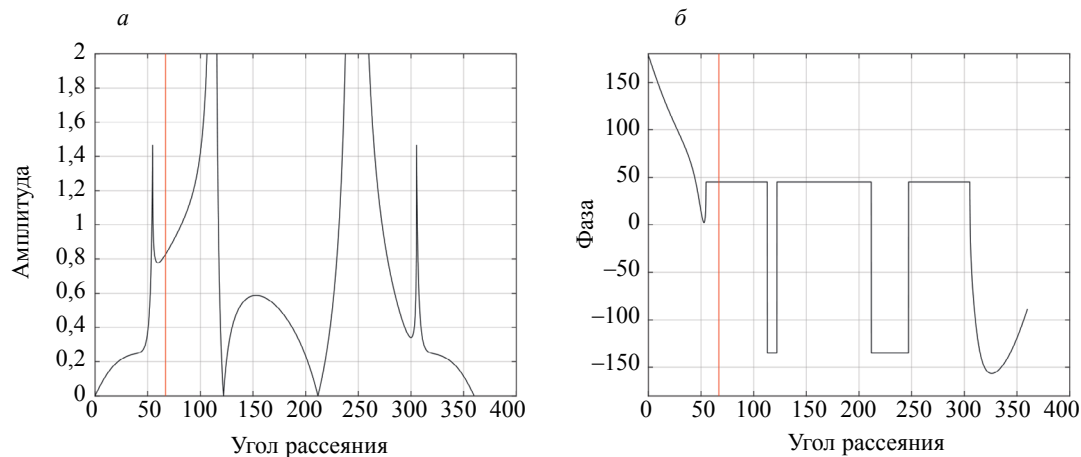


Рис. 4. Зависимость от угла наблюдения амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента рассеяния на нижнем крае трещины при падении поперечной волны ($\varphi_{xz}^{sl} = 247$ град).

фазе, а амплитуда импульса от верхнего края примерно в два раза меньше импульса от нижнего края трещины.

3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ БЛИКА

На рис. 5 схематически показана антенная решетка, установленная на призму, акустическая ось которой показана пунктирной линией красного цвета. Лучевая и фронтальная разрешающие способности метода ЦФА определяются длиной зондирующего импульса τ , скоростью волны в объекте контроля c , длиной ультразвуковой волны λ и угловой апертурой $\alpha_A(x, z)$ по следующим формулам [10]:

$$\Delta_{\text{луч}} \approx \frac{\tau c}{2}, \quad \Delta_{\text{фронт}}(x, z) \approx \frac{\lambda}{4} \frac{1}{\sin \frac{\alpha_A(x, z)}{2}}. \quad (1)$$

На рис. 5 показаны три точки в которых рассчитывается разрешающая способность. Угловая апертура $\alpha_A(x, z)$ определяется как угол между лучами, приходящими от крайних элементов антенной решетки в точку (x, z) (линии красного цвета на рис. 5). Если в точке (x, z) будет расположен точечный отражатель («жирная» точка черного цвета), то на ЦФА-изображении он будет выглядеть примерно как блик в виде эллипса, оси которого равны $\Delta_{\text{луч}}$ и $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$. Наклон эллипса $\varphi(x, z)$ определяется лучом, приходящим в точку (x, z) от центрального элемента антенной решетки (см. рис. 5). В локальной системе координат (x_l, z_l) с центром в месте залегания отражателя определим плоскую волну, распространяющуюся в направлении $\varphi(x, z)$, и приравняем ее нулю вне пределов эллипса. Сформированный таким образом эллипс будем называть эталонным и его можно рассматривать как приближенное представление функции рассеяния точки.

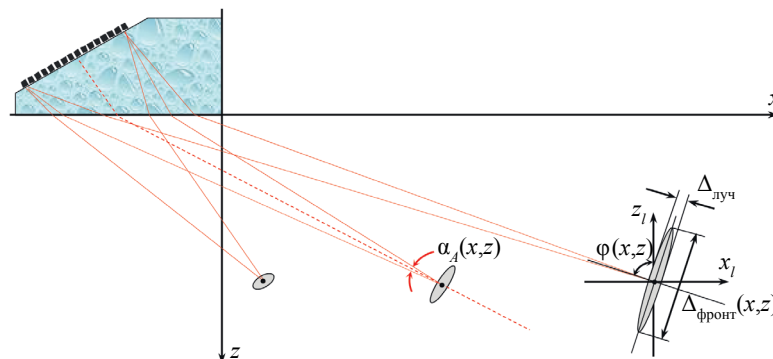


Рис. 5. К расчету параметров эталонного эллипса.

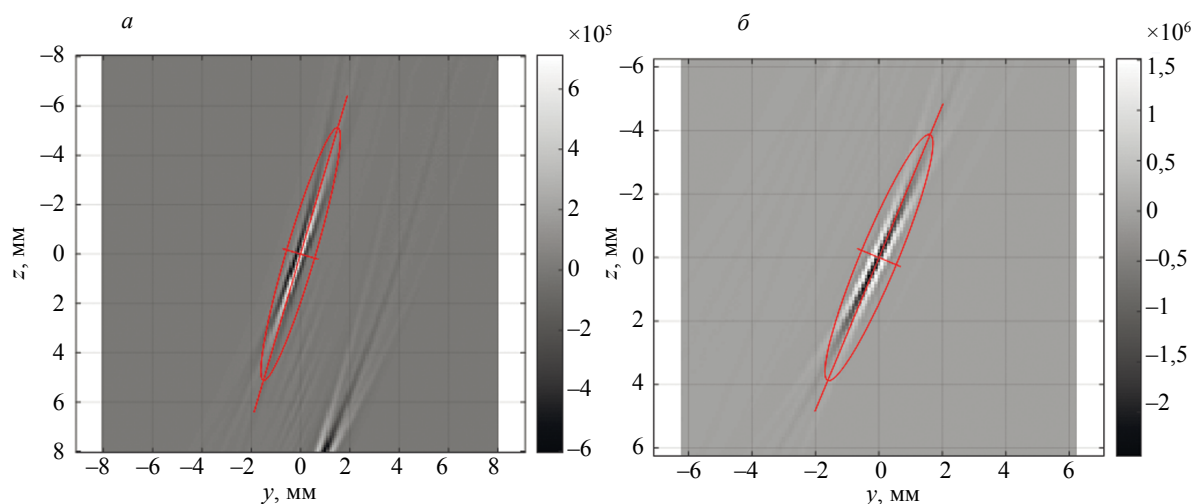


Рис. 6. ЦФА-изображения (только реальная часть) краев трещины (верхний край на глубине 25 мм (а), нижний край на глубине 35 мм (б)) и эталонных эллипсов.

На рис. 6 для примера показано ЦФА-изображение (только реальная часть) бликов верхнего (а) и нижнего (б) краев трещины (см. раздел 4.1.). На блики линиями красного цвета наброшены изображения эллипсов с осями, рассчитанными по формуле (1). Видно, что размер и наклон эталонного эллипса в целом совпадают с бликом ЦФА-изображения.

Маркер в виде эталонного эллипса, рассчитанного по формуле (1), на восстановленном изображении отражателей может помочь анализировать изображение, также как и маркер специальной формы, выводимый на изображение эхосигналов в методе TOFD.

3.1. Формирование дополнительного изображения фазы бликов

Принцип обработки ЦФА-изображения для получения информации о фазе бликов заключается в следующем [11]. Сначала составляется список координат (x, z) максимумов бликов ЦФА-изображения, которые превышают заданный уровень отсечки, затем для каждого элемента списка формируется эталонный эллипс, который коррелируется с окрестностью в области максимума ЦФА-изображения. По знаку корреляции или по его фазе, так как ЦФА-изображение можно восстановить в комплексном формате, оценивается фаза блика по отношению к эталонному эллипсу. Рассчитанное значение фазы комплексной функции корреляции помещается в точку (x, z) для формирования дополнительного изображения фазы с целью его анализа.

Такой подход позволяет в автоматическом режиме получить значение фазы во всех максимумах ЦФА-изображения и сформировать дополнительное фазовое изображение, которое должно позволить определить тип обнаруженного отражателя. Все фазовые изображения в данной статье получены таким способом.

3.2. Анализ двух выбранных бликов ЦФА-изображения

Возможен альтернативный вариант для анализа фазы бликов ЦФА-изображения. Он заключается в том, что оператор, анализируя ЦФА-изображение, выбирает с помощью маркеров максимумы двух бликов, которые могут указывать на края трещины или на два отражателя типа непровара. Для каждого из них строится свой эталонный эллипс, выделяются два фрагмента комплексного ЦФА-изображения в пределах эталонных эллипсов и выводится на экран монитора фаза функции корреляции двух выбранных фрагментов ЦФА-изображения.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовали эхосигналы, рассчитанные программой CIVA 2017 [12] с применением теории лучевых трубок. Полагалось, что эхосигналы регистрируются с помощью антенной решетки (5 МГц, 32 элемента размерами $0,76 \times 10$ мм, зазор между

краями элементов 0,04 мм), установленной на рексолитовую призму 35 град, которая перемещалась 20 раз с шагом 2 мм вдоль модели отражателя в однородном изотропном стальном образце толщиной 50 мм.

4.1. Вертикально расположенная трещина

На рис. 7 показано ЦФА-изображение В-типа трещины в виде прямоугольника высотой 10 мм и шириной 20 мм, контур которой выделен линией черного цвета. По полученному ЦФА-изображению по акустической схеме **TdT** (излучена поперечная волна (**T**), отражатель (**d**) рассеял поперечную волну (**T**)) очень сложно сделать вывод о типе отражателя, так как не удастся восстановить изображение всей границы отражателя. По дифракционным сигналам (см. раздел 2) восстанавливаются только два блика краев трещины, так как лучи, зеркально отраженные от плоскости трещины, не вернулись на приемную апертуру. Амплитуды бликов краев трещины отличаются примерно в два раза (см. раздел 2). Слева и справа от ЦФА-изображения трещины схематически показан рис. 2 для установления связи между системой координат, в которой проводится расчет коэффициентов отражения $D^{SV,SV}$ от краев трещины, и системой координат, в которой восстанавливалось ЦФА-изображение.

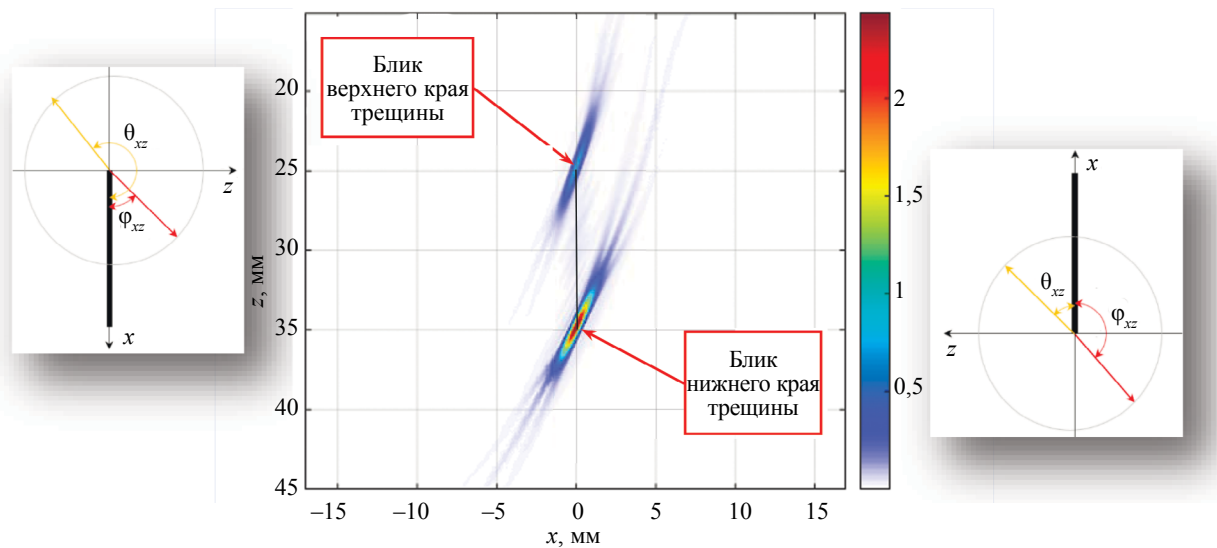


Рис. 7. ЦФА-изображения В-типа модели трещины.

На рис. 8 показана амплитуда (*а*) и фаза (*б*) изображения D-типа модели трещины, которая изображена полупрозрачным прямоугольником розового цвета с границей черного цвета. Так

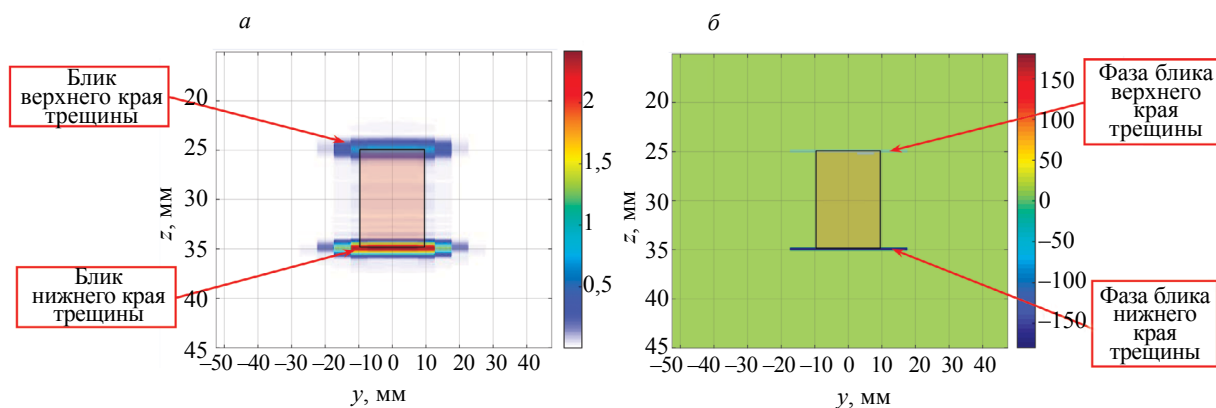


Рис. 8. Амплитуда (*а*) и фаза (*б*) изображения D-типа модели трещины.

как расчеты эхосигналов проводились в режиме 3D, то из-за размеров пьезоэлемента вдоль оси y , равного 10 мм, размеры бликов краев трещины больше 20 мм. Видно, что фазы бликов отличаются друг от друга примерно на 150 град, что позволяет утверждать, что они соответствуют краям трещины, а не двум нитевидным отражателям (типа непроваров), расположенных на глубинах 25 и 35 мм.

Важно отметить, что разница фазы бликов краев трещины в общем случае могут отличаться от 180 град по двум причинам. Во-первых, как показано в разделе 2, фазы комплексных коэффициентов дифракции на краях трещины могут различаются не точно на 180 град. Во-вторых, при работе на поперечной волне коэффициент преломления за первым критическим углом становится комплексным и будет зависеть от угла падения. Вторую проблему можно решить, как это делается в методе TOFD, анализируя эхосигналы только на продольной волне, а для решения первой проблемы изображение отражателей можно восстановить изображение отражателей методом инверсного C-SAFT [13], который устраняет влияние коэффициентов преломления на границе призма—объект контроля и коэффициента отражения на акустически мягкой границе объекта контроля.

4.2. Два боковых цилиндрических отражателя

На рис. 9 показано ЦФА-изображение В-типа двух цилиндров диаметром 2 мм и длиной 20 мм, расположенных на глубинах 25 и 35 мм. Цилиндры на рисунке показаны полупрозрачными кругами розового цвета с границей черного цвета. Так как по изображению на одной акустической схеме **TdT** не удастся восстановить изображение всей границы отражателя, то определить тип и количество отражателей очень сложно. Ложные блики, сформированные импульсами обегания—соскальзывания (см. раздел 2), могут служить признаками объемных отражателей. Но при реальном контроле эти блики далеко не всегда удастся идентифицировать.

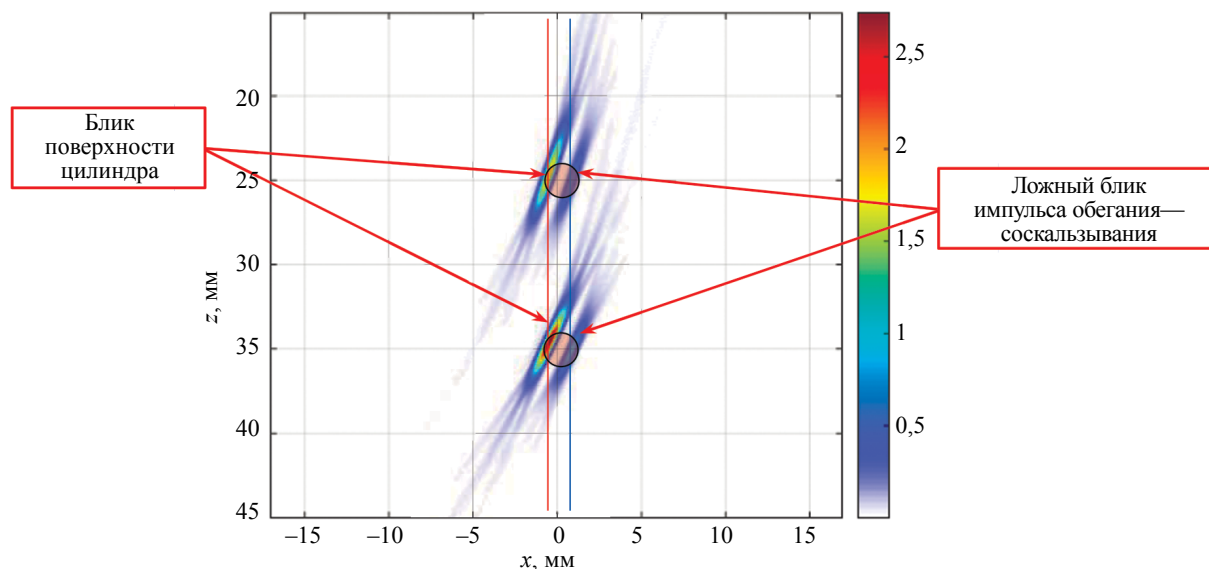


Рис. 9. ЦФА-изображения В-типа двух боковых цилиндрических отражателей.

На рис. 10 показана фаза изображений D-типа двух цилиндров для разных значений x : $-0,4$ мм (а) (на рис. 9 вертикальная линия красного цвета), $0,9$ мм (б) (на рис. 9 вертикальная линия синего цвета). Видно, что для двух фиксированных значений x фазы бликов совпадают с точностью до 20 град (рис. 10а), что указывает на объемный характер отражателей. Дополнительным указанием на тип отражателя может служить то обстоятельство, что фазы блика границы цилиндра и ложного блика отличаются примерно на 120 град (см. раздел 2). Таким образом, можно утверждать, что обнаружено два объемных отражателя, расположенных на глубинах 25 и 35 мм.

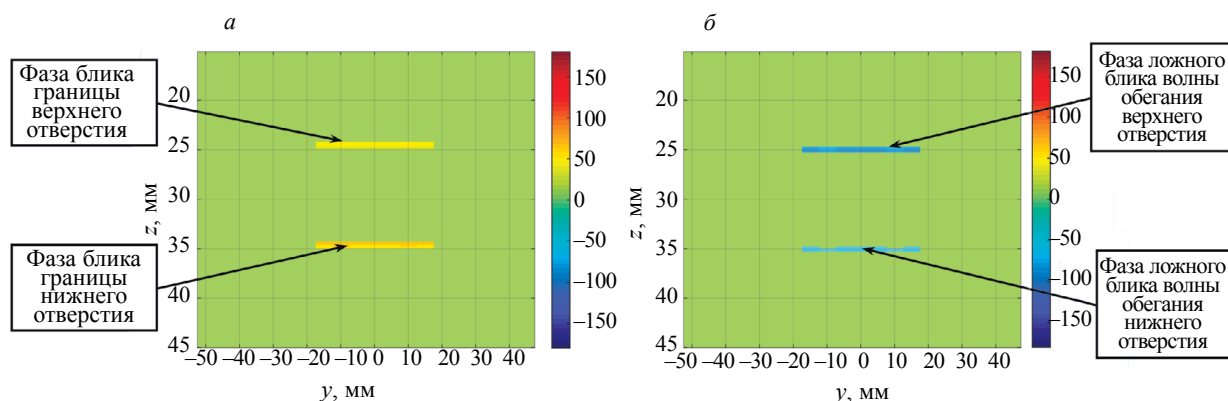


Рис. 10. Фаза изображений D-типа двух цилиндров для разных значений x : $-0,4$ мм (а); $0,9$ мм (б).

5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [14].

5.1. Усталостная трещина в фрагменте трубопровода Ду800

Измерения проводили на образце, сделанном из фрагмента трубопровода Ду800 толщиной 38 мм, в котором со стороны наплавки толщиной 5 мм был выфрезерован паз. В пазе сделана затравка, в результате рассчитанного числа циклических нагрузок была выращена продольная усталостная трещина заданной высоты. Затем затравка выфрезерована, и паз заварен. Изготовленный образец содержит в себе усталостную трещину практически идентичную той, которая могла бы возникнуть в сварном соединении в результате эксплуатации. Эхосигналы регистрировались антенной решеткой (5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента $0,76 \times 10$ мм, зазор 0,4 мм), установленной на рексолитовую призму 35 град. Антенная решетка перемещалась с шагом 2 мм вдоль сварного соединения для получения трехмерного изображения объекта контроля.

На рис. 11 и 12 показана амплитуда (а) и фаза (б) ЦФА-изображения D-типа трещины для двух значений x (акустическая схема **TdT**). Наличие двух рисунков связано с тем, что трещина не была ориентирована строго вертикально, поэтому на рис. 11 лучше виден блик вершины трещины, а на рис. 12 — блик ее нижнего края. Ожидаемый вид усталостной трещины показан полупрозрачной областью розового цвета с границей черного цвета. Как и следовало ожидать, в отличие от случая численного моделирования, изображение зашумлено, особенно, в области дна, наплавки и нижнего края трещины.

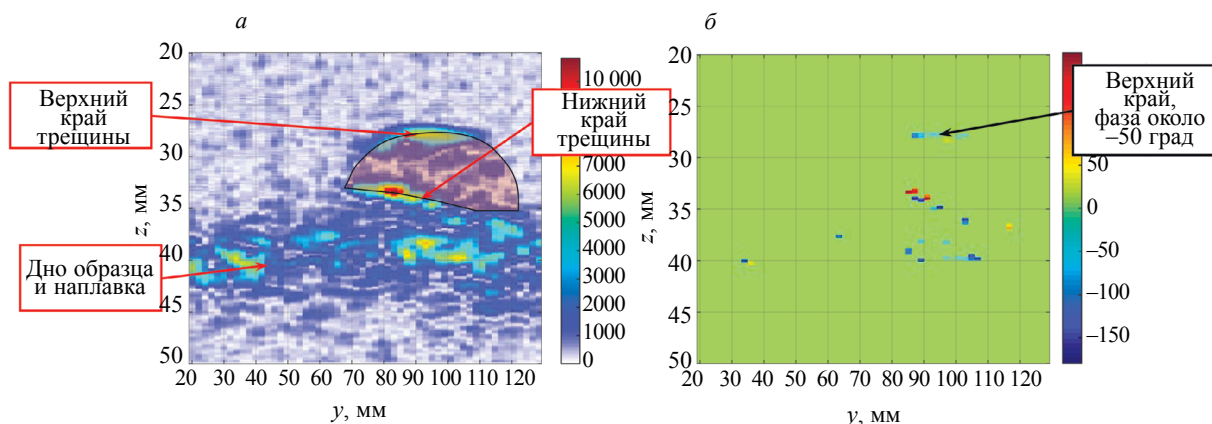


Рис. 11. Амплитуда (а) и фаза (б) изображения D-типа трещины (верхний край).

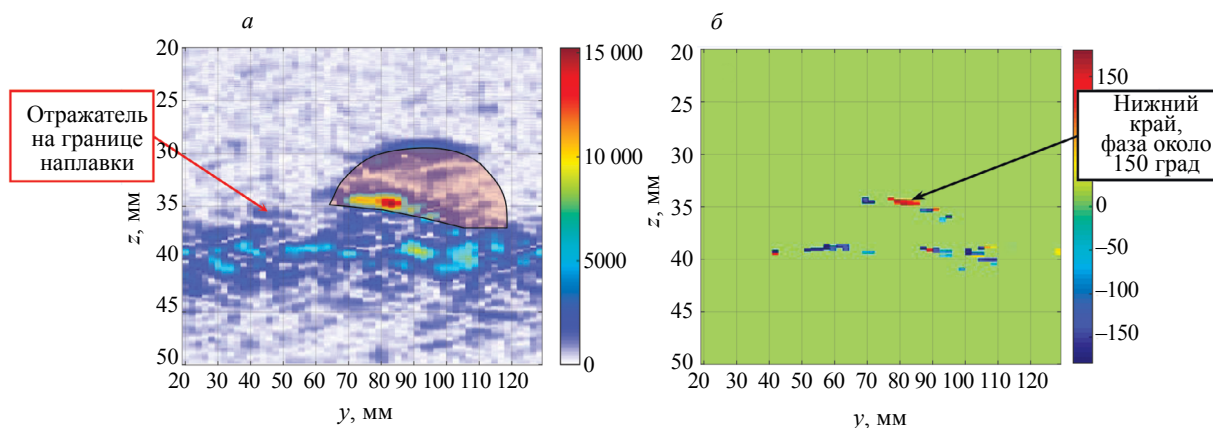


Рис. 12. Амплитуда (а) и фаза (б) изображения D-типа трещины (нижний край).

Предложенный алгоритм определения фазы блика рассчитан на то, что он соответствует одному точечному отражателю (см. рис. 5). Поэтому фаза блика вершины трещины, которая является единственным отражателем, определяется корректнее. Если блик сформирован бликами двух и более неразрешающихся отражателей, то из-за интерференции между бликами фаза суммарного блика уже не будет соответствовать фазе плоской волны и определение фазы будет происходить с ошибкой. В отличие от верхнего края трещины, ее нижний край находится рядом с границей наплавки, на которой могут находиться отражатели, возникшие при изготовлении наплавки (см. рис. 12а). Во-вторых, из-за возникновения (при рассеивании на вершине трещины поперечной волны) трансформированных волн, распространяющихся вдоль поверхности трещины, могут возникнуть ложные блики рядом с бликом нижнего края трещины. И, в-третьих, после заварки паза с затравкой могли появиться дополнительные отражатели. Все это привело к тому, что фазовая картина нижнего края трещины не такая отчетливая, как у верхнего. Тем не менее, видно, что разница фаз бликов верхнего и нижнего края трещины примерно 200 град (см. раздел 2).

Отметим, что контроль этого образца методом TOFD позволил хорошо выявить импульс верхнего края трещины, но обнаружить импульс от нижнего края трещины, в отличие от ЦФА-изображения, оказалось крайне затруднительно.

6. ВЫВОДЫ

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

Предложен алгоритм для определения фазы бликов ЦФА-изображения. Анализ фазы бликов (как и анализ фазы эхосигналов в методе TOFD) должен помочь определить тип обнаруженного отражателя.

Численные и модельные эксперименты по анализу бликов ЦФА-изображений, восстановленных на поперечных волнах, показали, что фазы бликов краев вертикальных трещин отличаются на 180 ± 30 град. Фазы бликов двух боковых цилиндрических отражателей в численном эксперименте различались на ± 20 град. Полученную точность определения фаз можно полагать достаточной, чтобы считать предложенный алгоритм работоспособным.

Предложенный подход может применяться и для обработки ФАР-изображений, но при условии регистрации радиосигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 2011. № 1 (51). С. 64—70.
2. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
3. Базулин Е.Г. Два подхода к ультразвуковой дефектометрии: анализ высококачественного изображения отражателей и корреляционный анализ измеренных эхосигналов // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 11—32.

4. *Silk M.G., Lidington B.H.* The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth // *Non-Destructive Testing*. 1975. V. 8. No. 6. P. 146—151.
 5. *Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D.* SAFT – the Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing // *NDT International*. 1986. V. 19. P. 163—167.
 6. *Голубев А.С.* Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // *Акустический журнал*. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
 7. *Pao Y.H., Mow C.C.* Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations. New York: Crane Russak, 1973. 685 p.
 8. *Achenbach J.D., Gautesen A.K., McMaken H.* Ray Methods For Waves In Elastic Solids: With Applications To Scattering. Boston / London / Melbourne : Pitman Advanced Publishing Program, 1982.
 9. *Zernov V., Fradkin L.J., Darmon M.* A refinement of the Kirchhoff approximation to the scattered elastic fields // *Ultrasonics*. 2012. № 7. P. 830—835.
 10. *Каневский И.Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М.: Наука, 1977. С. 336.
 11. *Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С.* Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками // *Контроль. Диагностика*. 2015. № 8. С. 7—22.
 12. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 04.12.2018.)
 13. *Базулин Е.Г.* Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // *Дефектоскопия*. 2015. № 1. С. 58—71.
 14. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 04.12.2018.)
-