

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ОТРАЖАТЕЛЯ ПО АМПЛИТУДАМ БЛИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПО РАЗНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СХЕМАМ

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.Х. Вовилкин¹, Д.С. Тихонов¹

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в 25.01.2021; после доработки 09.02.2021

Принята к публикации 12.02.2021

В ультразвуковой дефектоскопии разработаны методы регистрации и анализа эхосигналов для определения типа отражателя и его размеров. Метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) позволяет восстановить изображение всей границы несплошности, используя эхосигналы, отраженные от дна объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Однако такой подход не всегда применим на практике, так как форма дна объекта контроля может быть неизвестной. Используя особенности поведения коэффициента отражения для разных типов волн можно по изображениям только на прямом луче сделать заключение о типе отражателя. Численные и модельные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровая фокусировка антенной решеткой (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM).

DOI: 10.31857/S0130308221040011

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение типа отражателя является важной задачей ультразвукового неразрушающего контроля, так как наличие в объекте контроля трещин, способных к быстрому росту, крайне опасно. И наоборот, наличие объемных отражателей может несущественно сказаться на прочностных свойствах объекта контроля. Метод цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) позволяет восстановить изображение всей границы несплошности, используя эхосигналы, отраженные от дна объекта контроля с учетом трансформации типа волны [1—4]. Однако такой подход не всегда применим на практике, так как форма дна объекта контроля может быть неизвестной или же оно может быть покрыто коррозионными язвами. Поэтому разработка методов, позволяющих сделать обоснованное суждение о типе отражателя по эхосигналам только на прямом луче, сохраняет свою актуальность.

В статьях [5, 6] был предложен способ определения типа отражателя с использованием акустического коэффициента формы, рассчитываемым по амплитудам импульсов, отраженных от верхнего и нижнего края несплошности. Недостатком такого подхода является то, что нужно сделать предположение, не всегда обоснованное, что два анализируемых эхосигнала рассеяны одним и тем же отражателем. Для определения типа отражателя в статье [7] было предложено анализировать амплитуды эхосигналов, полученные специальным преобразователем, рассчитанным на работу с разными типами волн при отражении от несплошности. Низкая чувствительность, необходимость разработки и изготовления специализированных двухэлементных преобразователей затрудняют применение на практике такого подхода. В статье [8] предложен метод определения типа отражателя за счет анализа фазы бликов отражателей по комплексным изображениям, восстановленным методом ЦФА на прямом луче. Однако для уверенного примирения такого метода нужно, чтобы эхосигналы от краев отражателя не перекрывались с иными импульсами. Подобный принцип определения типа отражателя был заложен в технологию Time of Flight Diffraction (TOFD) при ее разработке [9].

Антенные решетки, в силу малого размера каждого элемента, позволяют эффективно работать как с продольной, так и с поперечной волнами. Предлагаемый способ можно рассматривать как дальнейшее развитие метода [7], который должен помочь решить задачу определения типа отражателя с использованием трех его изображений, восстановленных методом C-SAFT по одному набору эхосигналов, измеренному в режиме двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC)).

2. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА

Предлагаемый способ определения типа отражателя основан на разном поведении коэффициента рассеяния для разных типов волн на объемном отражателе и на краях плоскостного отражателя.

2.1. Коэффициент рассеяния на цилиндре с мягкой границей

Для расчета поля, рассеянного цилиндром с мягкой границей, при падении плоской гармонической волны, можно воспользоваться точным аналитическим решением задачи [10]. На рис. 1 показаны значения модуля коэффициентов рассеивания на боковом цилиндрическом отверстии (БЦО) диаметром 1 мм в стальном образце при падении плоской волны с частотой 5 МГц. Прямоугольником с красной полупрозрачной заливкой показана область, соответствующая рассеянию в обратном направлении к направлению падающей плоской волны. Видно, что при рассеянии продольной волны в продольную (LdL) и при рассеянии поперечной волны в поперечную (TdT) значения индикатрисы рассеяния принимают значения больше 0,5. Но при рассеянии продольной волны в поперечную (LdT) значения индикатрисы рассеяния в обратном направлении меньше 0,15 в диапазоне углов ± 10 град. Подобная картина наблюдается и при рассеянии поперечной волны в продольную (TdL). Модуль коэффициентов отражения при смене типа волны практически в четыре раза меньше, чем для случая отсутствия трансформации типа волны.

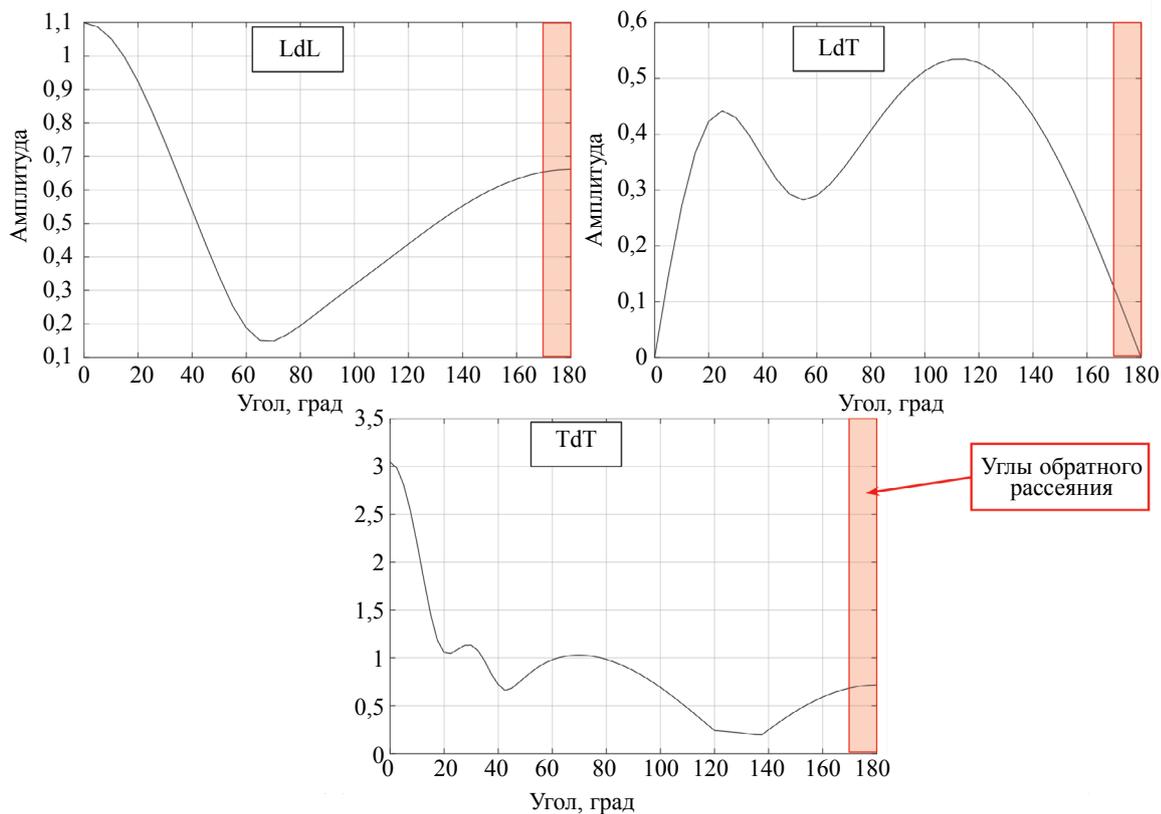


Рис. 1. Модуль коэффициентов рассеяния на БЦО диаметром 1 мм в стальном образце при падении плоской волны с центральной частотой 5 МГц.

2.2. Коэффициент рассеяния плоской волны на крае полубесконечной трещины

В работах [11, 12] в рамках теории геометрической дифракции приведены выражения для расчета коэффициента отражения плоской волны от края полубесконечной трещины. На рис. 2 показаны значения модулей коэффициентов рассеяния на краю трещины в стальном образце при падении плоской волны с частотой 5 МГц в направлении обратном направлению падения пло-

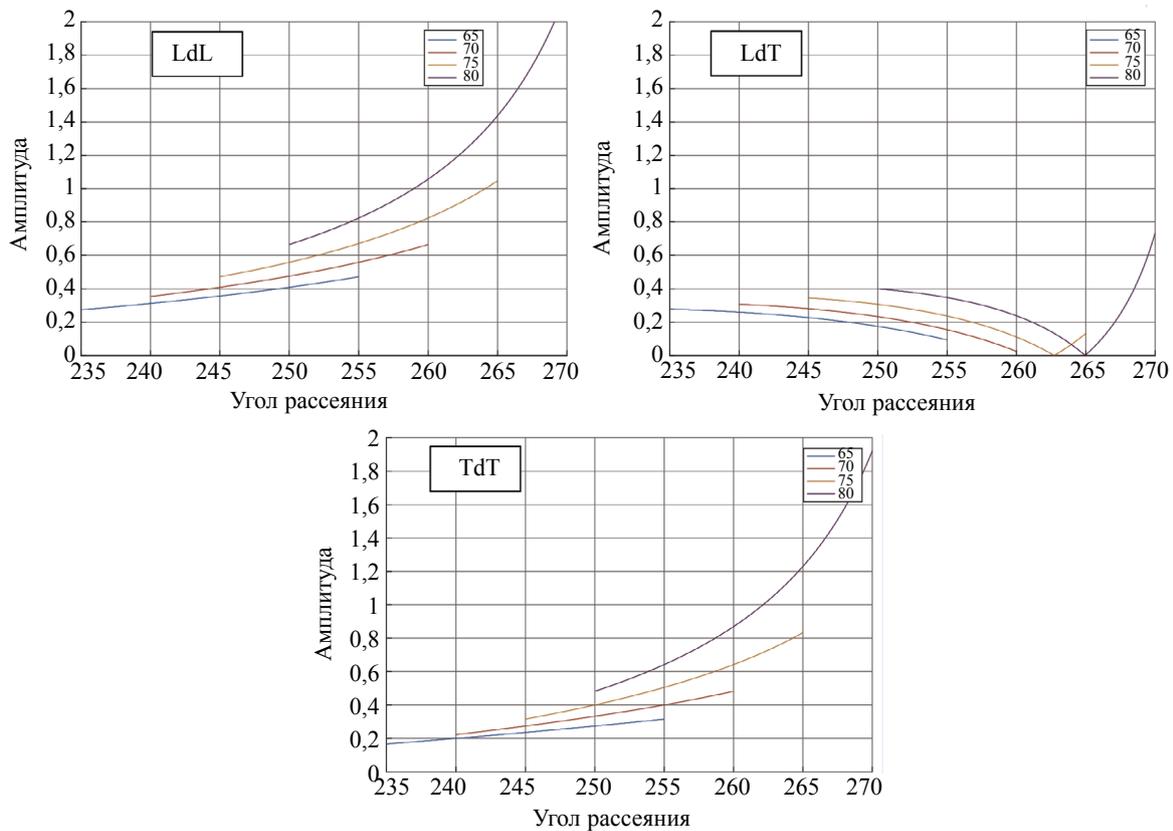


Рис. 2. Модуль коэффициентов рассеяния на крае трещины в стальном образце при падении плоской волны с частотой 5 МГц под углами к плоскости трещины 65, 70, 75 и 80 град в обратном направлении в диапазоне углов ± 10 град.

ской волны в диапазоне углов ± 10 град. Показаны результаты расчетов для углов падения к плоскости трещины 65, 70, 75 и 80 град. Такие углы соответствует рассеянию плоской волны на верхнем крае трещины. Видно, что для всех типов рассеяния (LdL, LdT и TdT) для углов падения 65, 70, 75 град коэффициенты рассеяния отличаются друг от друга примерно в три раза. Но при увеличении угла падения до 80 град коэффициент рассеяния без трансформации типа волны (LdL и TdT) уже может на порядок превышать амплитуду рассеянного поля при смене типа волны (LdT). Такие углы характерны при значительном удалении антенной решетки от отражателя, как это показано на рис. 4. Подобная картина наблюдается и при рассеянии на нижнем крае трещины.

Следует отметить, что амплитуды измеренных эхосигналов определяется не только коэффициентами рассеяния, модули которых показаны на рис. 1 и 2, но и коэффициентами преломления на границе призмы и объекта контроля, и расстоянием от точек излучения и приема до отражателя. Интегрирование по поверхности излучения и приема при расчете эхосигналов приведет к тому, что их амплитуды будут отличаться от амплитуд коэффициентов рассеяния.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки предложенного способа определения типа отражателя использовались эхосигналы, рассчитанные программой CIVA [13] по теории лучевых трубок в твердом теле. Полагалось, что эхосигналы регистрируются в режиме двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC)) с помощью антенной решетки (5 МГц, 32 элемента размерами $0,55 \times 10$ мм, зазор между краями элементов 0,05 мм), установленной либо на рексолитовую 35-градусную призму, либо на плексигласовую 20-градусную призму. Расчет поля проходил в 5 точках x_w передней грани призмы с координатами -50, -40, -30, -20 и -10 мм. На рис. 3 призма показана в самой удаленной точке $x_w = -50$ мм.

3.1. Трещина высотой 10 мм

Рассчитывались эхосигналы, рассеянные трещиной высотой 10 мм с центром в точке (0, 30) мм (на рис. 3 показана толстой линией черного цвета), и эхосигналы, рассеянные двумя БЦО диаметром 1 мм с центром в точках (0, 25) и (0, 35) мм. Центры БЦО имеют такие же координаты, что и края трещины. На рисунке схематически показан вариант рассеяния плоской волны на верхнем крае трещины по схеме LdT с преобразованием типа волны. Зеленым цветом обозначаются лучи на продольной волне, а красным — на поперечной.

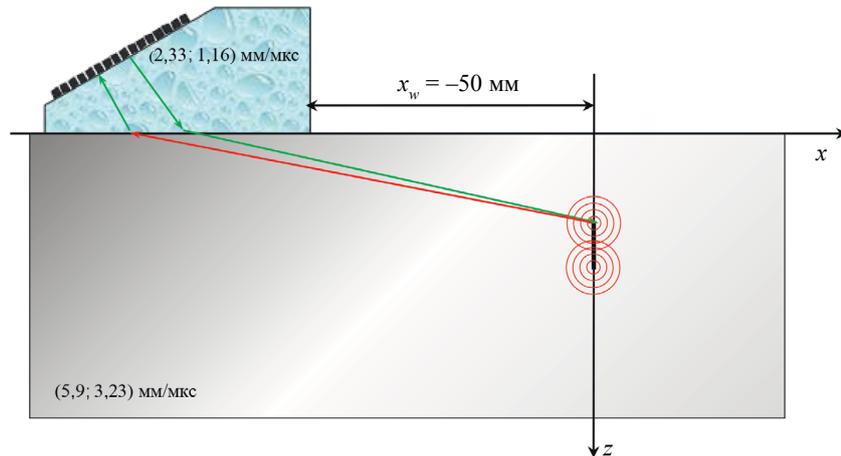


Рис. 3. Схематическое представление модели для проведения расчетов 35-градусной призмой.

По рассчитанным эхосигналам методом C-SAFT [4] восстанавливались изображения трещины по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT. На рис. 4 показаны изображения трещины, полученные с использованием 35-градусной реколлитовой призмы при расположении ее в точке

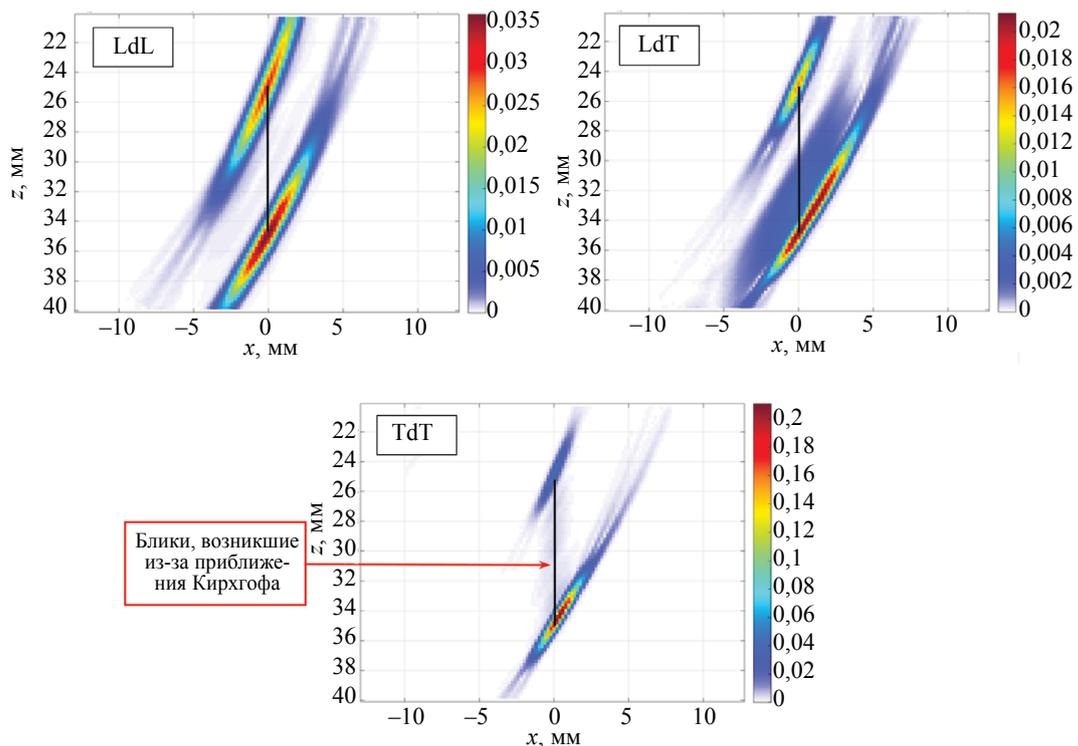


Рис. 4. Изображения трещины по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT при расположении призмы в точке -30 мм.

–30 мм. Краям трещины, которая показана на рисунках линией черного цвета, соответствуют блики, восстановленные по импульсам, дифрагированных на ее краях, которые окружностями красного цвета схематично показаны на рис. 3. Об амплитуде бликов можно судить по амплитуде цветовой шкалы справа от каждого рисунка. На изображении, полученном по акустической схеме TdT, как будто бы видны диффузные блики поверхности трещины. Их появление объясняется использованием для расчета эхосигналов приближения Кирхгофа. Строго говоря, имея в наличии изображения на рис. 4, утверждать, что обнаружена трещина, нельзя, так как эти блики могут быть сформированы двумя объемными отражателями разных диаметров с координатами близкими к краям трещины.

3.2. Два БЦО диаметром 1 мм

На рис. 5 показаны изображения двух БЦО диаметром 1 мм, полученные с использованием 35-градусной рексолитовой призмы при расположении ее в точке –30 мм. Видно, что границам БЦО (отображены на рисунках окружностями черного цвета) соответствуют блики, об амплитуде которых можно судить по амплитуде цветовой шкалы справа от каждого рисунка. На изображениях кроме бликов границ БЦО видны блики, сформированные импульсами обегания/соскальзывания (далее по тексту обегания) разной природы. Теоретически их можно рассматривать как косвенные признаки наличия объемного отражателя, но при анализе реальных изображений эти блики могут быть незаметны на фоне помехи или их будет сложно однозначно связать с бликом границы БЦО. Как и при анализе изображений на рис. 4, уверенно решить задачу определения типа отражателя и утверждать, что обнаружены два объемных отражателя, невозможно.

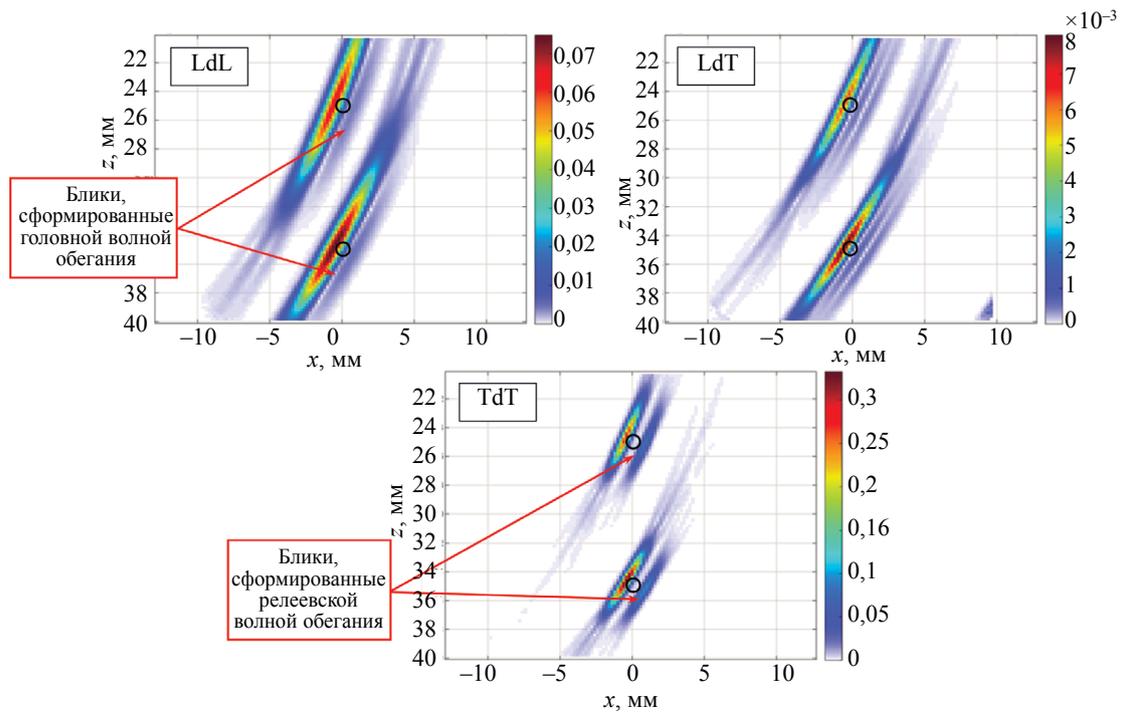


Рис. 5. Изображения двух БЦО по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT.

Изображения, подобные тем, что на рис. 4 и 5, получаются и при использовании 20-градусной плексигласовой призмы, по ним так же невозможно уверенно определить тип отражателя, и поэтому изображения здесь не приводятся.

3.3. Способ определения типа отражателя

Способ определения типа отражателя заключается в следующем. По единожды измеренному в режиме двойного сканирования набору эхосигналов методом C-SAFT восстанавливаются три изображения отражателя по акустическим схемам LdL, LdT и TdT для определения амплитуды

их бликов. Если обозначить через A_{LL} , A_{LT} и A_{TT} амплитуды бликов одного отражателя на изображениях, восстановленных по разным акустическим схемам, то можно определить коэффициент

$$K = \frac{A_{LT}}{(A_{LL} + A_{TT})/2}. \quad (1)$$

Если K меньше некоторого уровня K_{level} , то можно утверждать, что блик соответствует отражателю объемного типа. Если K будет больше уровня K_{level} , то можно утверждать, что обнаруженный отражатель плоскостной. Для этого нужно определить уровень K_{level} , который, строго говоря, является функцией глубины h залегания отражателя и координат призмы x_w .

На рис. 6 показано значение коэффициента K при расчете его по бликам верхнего и нижнего краев трещины для пяти положений рексолитовой 35-градусной рексолитовой призмы. Видно, что за исключением двух точек ($x_w = -40$ и -50 мм) для нижнего края трещины коэффициент K больше 0,1.

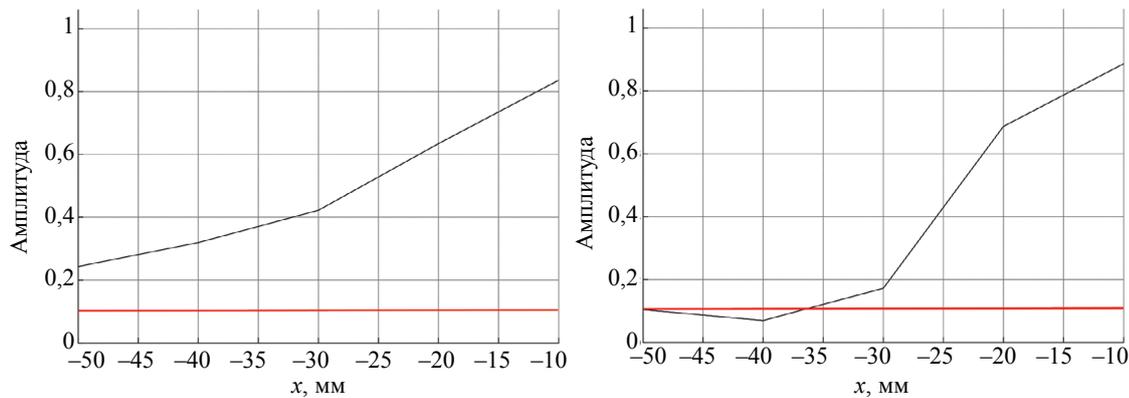


Рис. 6. Значение коэффициента K при расчете его по бликам верхнего и нижнего краев трещины для пяти положений 35-градусной рексолитовой призмы.

На рис. 7 показано значение коэффициента K при расчете его по бликам верхнего и нижнего краев трещины для пяти положений 20-градусной плексигласовой призмы. Видно, что за исключением одной точки ($x_w = -50$ мм) для нижнего края трещины коэффициент K больше 0,1.

На рис. 8 показано значение коэффициента K при расчете его по бликам двух БЦО для пяти положений 35-градусной рексолитовой призмы. Видно, что для всех положений призмы коэффициент K меньше 0,1.

На рис. 9 показано значение коэффициента K бликов верхнего и нижнего краев трещины для пяти положений рексолитовой 20-градусной плексигласовой призмы. Видно, что для всех положений призмы коэффициент K меньше 0,1.

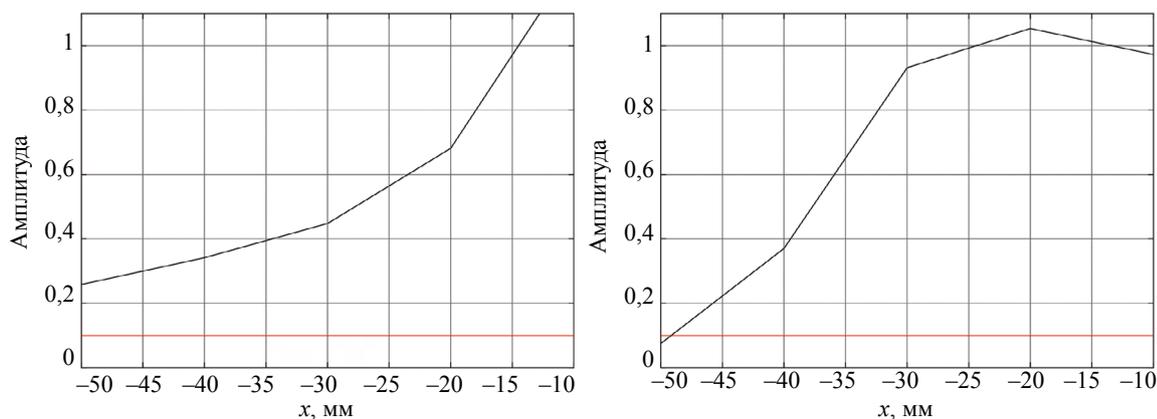


Рис. 7. Коэффициент K бликов верхнего и нижнего краев трещины для пяти положений 20-и градусной плексигласовой призмы.

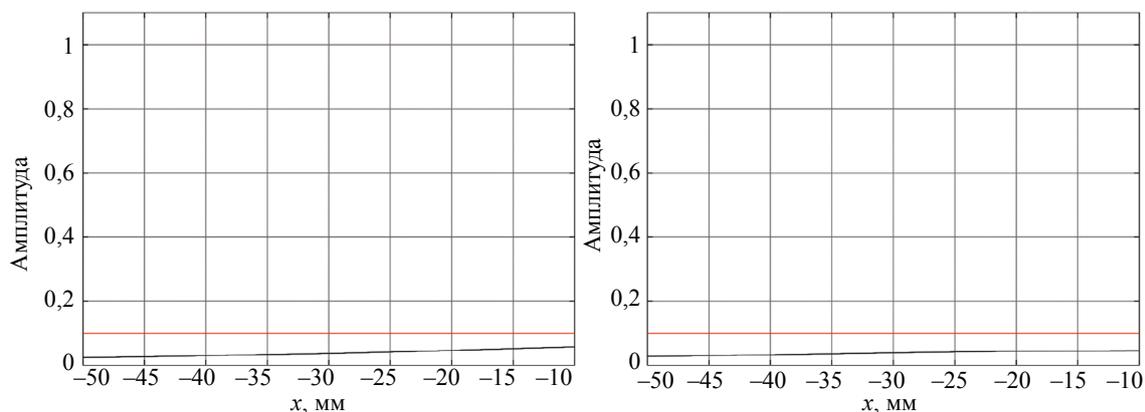


Рис. 8. Коэффициент K бликов двух БЦО для пяти положений 35-градусной рексолитовой призмы.

Анализ графиков на рис. 6—9 позволяет сделать вывод, что для объемных отражателей — $K < 0,1$, а для плоскостных отражателей — $K < 0,1$, то есть $K_{level} = 0,1$. Это утверждение справедливо при размещении призмы на расстояниях x_w больше, чем -40 мм.

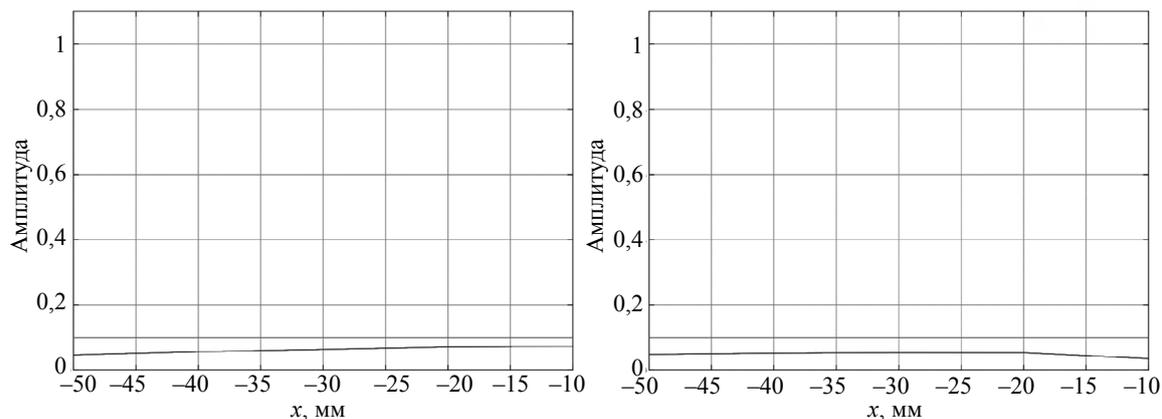


Рис. 9. Значение коэффициента K при применении его к бликам двух БЦО для пяти положений 20-и градусной плексигласовой призмы.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием ЦФА-дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [14]. Эхосигналы регистрировали антенной решеткой (5 МГц, 32 элемента, ширина пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,05 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму.

4.1. Трещина высотой 5 мм

Измерения проводили на образце с моделью трещины высотой 5 мм с центром на глубине 21,5 мм. Образец изготавливали следующим образом: в заготовке из стали марки 20 было просверлено БЦО, далее заготовку нагревали до 1000 град и помещали в пресс для полного схлопывания отверстия в модель трещины. Из полученной заготовки получали прямоугольный образец, показанный на рис. 10.

На рис. 11 показаны изображения трещины, восстановленные методом C-SAFT по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT по одному набору измеренных эхосигналов. Как и на изображениях на рис. 4, блики краев трещин на всех трех изображениях хорошо заметны и соответствуют

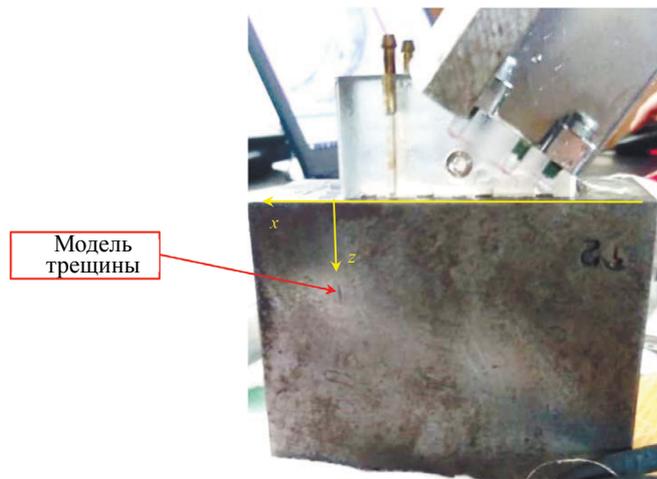


Рис. 10. Фотография образца с моделью трещины высотой 5 мм.

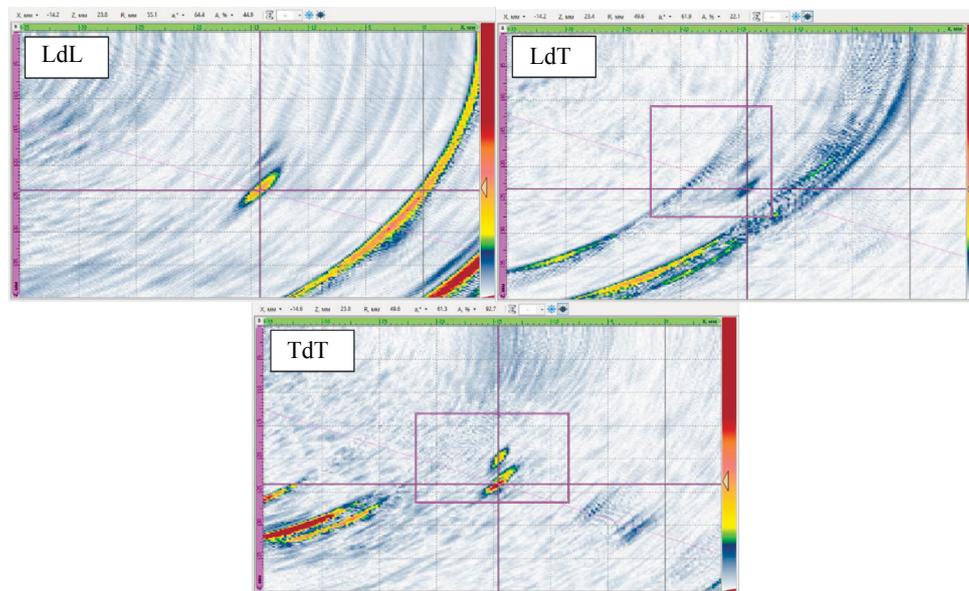


Рис. 11. Изображения трещины высотой 5 мм по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT.

краям трещины. Коэффициент K для блика нижней границы трещины равен примерно 0,32, а для блика верхней границы — коэффициент K больше 0,5, что позволяет сделать заключение, что обнаружен плоскостной отражатель, размеры которого можно определить с помощью двух бликов уставленных на их максимумы.

4.2. Два БЦО сверления диаметром 2 мм

Измерения проводили на образце, изготовленном из стали марки 20, с двумя БЦО диаметром 2 мм, просверленными на глубинах 13 и 18 мм (рис. 12).

На рис. 13 показаны изображения БЦО 1 и БЦО 2 диаметром 2 мм, восстановленные по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT. Как и на рис. 5, амплитуда бликов границ БЦО на изображениях, восстановленных по акустическим схемам LdL и TdT, практически на порядок больше амплитуды бликов изображения, восстановленного по акустической схеме LdT. Коэффициент K для бликов БЦО 1 и БЦО 2 равен примерно 0,1. Это позволяет предположить, что тип обнаруженного отражателя объемный.

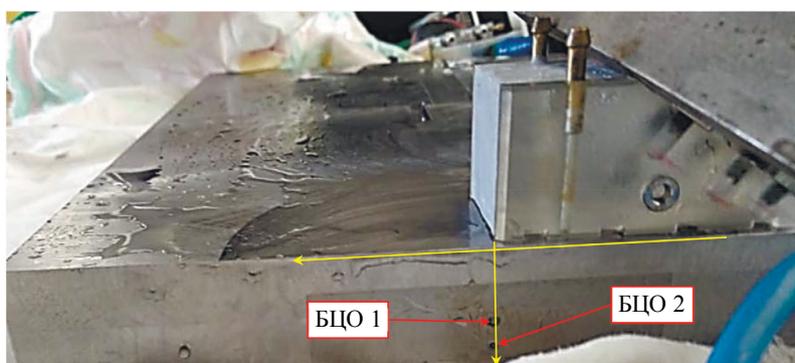


Рис. 12. Фотография образца с БЦО 1 и БЦО 2 диаметром 2 мм.

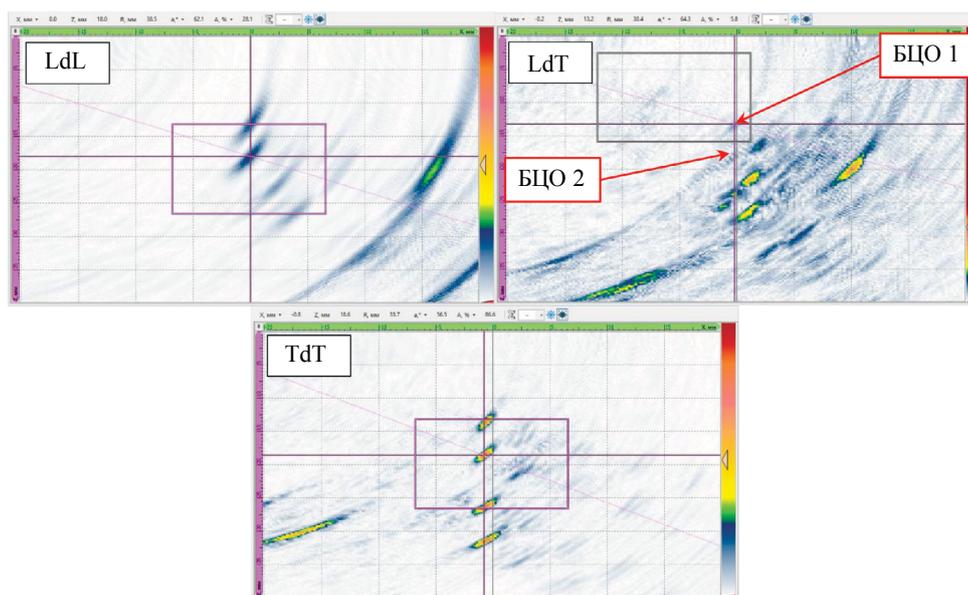


Рис. 13. Изображения БЦО 1 и БЦО 2 диаметром 2 мм по трем акустическим схемам LdL, LdT и TdT.

5. ВЫВОДЫ

Предлагаемый способ определения типа отражателя с помощью значения коэффициента K и уровня $K_{level} = \text{БЦО } 0,1$ позволяет сделать обоснованное предположение о типе обнаруженного отражателя. Конкретное значение K_{level} должно определяться при разработке методики контроля объекта. Надо отдавать отчет в том, что предложенный способ не дает со 100 % точностью ответ на вопрос о типе отражателя. Однако анализ значения коэффициента K предоставляет оператору дополнительную информацию для принятия более точного решения о типе отражателя.

Отметим, что предлагаемый способ подходит для работы с фазированными антенными решетками (ФАР). Для этого надо получить ФАР-изображения отражателя для трех законов фокусировки по акустическим схемам LdL, LdT и TdT. Естественно, что используемый ФАР-дефектоскоп должен поддерживать режим фокусировки, когда излучение происходит на продольной волне, а прием на поперечной волне (LdT).

Авторы выражают благодарность сотруднику системного отдела «НПЦ «ЭХО+» А.В. Заушицыну за проведение экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching re-construction of ultrasonic array data exploiting forwards models / 6th Int'l Workshop. NDT Signal Processing. August 25—27. 2009. London. Ontario. Canada.

2. *Deleye X., Hörchens L., Chougrani K.* Experimental comparison of wave-field based ultra-sonic imaging with other advanced ultrasonic weld inspection techniques / 18th World Conference on Nondestructive Testing. 16-20 April 2012. Durban. South Africa
3. *Базулин Е.Г.* Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
4. *Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.* Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21—38.
5. *Щербинский В.Г., Белый В.Е.* Новый информационный признак характера дефектов при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 1975. № 3. С. 27—37.
6. *Ушаков В.М., Белый В.Е., Вopilкин А.Х.* Экспериментальное исследование акустических полей рассеяния продольных и поперечных волн на эллиптических полостях // Дефектоскопия. 1987. № 3. С. 47—51.
7. *Цомук С.Р.* Экспериментальное исследование отношения амплитуд волн различного типа как идентификационного признака дефекта / Сб. трудов XI Всесоюзной научно-технической конференции по неразрушающим физическим методом и средствам контроля. 1978. Т. 1. С. 134.
8. *Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh.* et al. Analyzing the Phase of DFA Image for Determining the Type of Detected Reflector // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 507—516. [*Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Сухоруков Н.И., Тихонов Д.С.* Анализ фазы ЦФА-изображения с целью определения типа обнаруженного отражателя // Дефектоскопия. 2019. № 7. С. 20—29.]
9. *Silk M.G., Lidington B.H.* The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth // Non-Destructive Testing. 1975. June. V. 8. P. 146—151.
10. *Голубев А.С.* Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // Акустический журнал. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
11. *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.
12. *Djakou A.K., Darmon M., Fradkin L.J., Chatillon S.* A system model for ultrasonic NDT based on the Physical Theory of Diffraction (PTD). doi 10.1016/j.ultras.2015.08.006
13. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 07. 01.2021).
14. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 07. 01.2021).