

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В ОБЪЕМЕ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА

© 2019 г. Е. С. Мороков<sup>a</sup>, \*, В. М. Левин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН,  
Россия, 119334 Москва, ул. Косыгина 4

\*e-mail: es\_morokov@yahoo.com

Поступила в редакцию 09.06.2018 г.

После доработки 05.10.2018 г.

Принята к публикации 30.10.2018 г.

Одной из активных областей применения длиннофокусных высокочастотных пучков является объемная визуализация материалов и внутренних границ соединения. Визуализация осуществляется пучками, прошедшими через границу иммерсия–образец и изменившими свою геометрию вследствие различий в преломлении лучей, падающих под разными углами на границу раздела. Структура пучка при преломлении существенно искажается и трансформируется в каустику. Оказывается актуальным вопрос пространственного разрешения при формировании акустических изображений микроструктуры в объеме материала. В данной работе приводится теоретический анализ пространственного разрешения с учетом рефракционных аберраций при формировании изображений границ раздела, расположенных на значительной глубине в объеме образца. Приводятся результаты экспериментальной визуализации границы соединения материалов. Показано, что теоретическая оценка хорошо согласуется с экспериментальной величиной разрешения сходящихся в объеме образца пучков продольных волн.

**Ключевые слова:** разрешение, акустическая микроскопия, микроструктура, фокусированный пучок, адгезия

DOI: 10.1134/S0320791919020102

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач ультразвукового контроля является выявление и локализация дефектов адгезии на границе соединения между материалами. Для разных типов соединения – от плотного прижима до жесткого соединения в виде адгезионных, клеевых и диффузионных контактов – неоднократно предлагались методы оценки контакта с применением плоских и фокусированных ультразвуковых пучков [1–10]. Для каждого случая визуализации и оценки стоит вопрос об отображении границ дефектных областей, четкость которых напрямую определяется пространственным разрешением применяемой ультразвуковой системы.

Обычно вопрос о пространственном разрешении ставится в дифракционном пределе для идеальных фокусирующих систем. Разрешение в этом случае определяется размером фокального пятна зондирующего пучка, и математически выражается в виде известного критерия Рэлея [11] – два структурных элемента в фокальной плоскости зондирующего пучка разрешаются на изобра-

жении, если расстояние  $l$  между ними превосходит диаметр фокального пятна (кружка Эйри):

$$d_f = 0.61\lambda / \sin \theta_m, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $\theta_m$  – апертурный угол между осью конуса сходящихся лучей и краевыми лучами. В акустической микроскопии, использующей в качестве источника/приемника фокусированного ультразвука фокусирующие преобразователи или акустические линзы из материала с высокой скоростью звука, зондирующее излучение в иммерсионной жидкости по структуре близко к идеально фокусированным пучкам. Поэтому при формировании изображений поверхности объекта пространственное разрешение таких пучков близко к дифракционному пределу [11].

Визуализация микроструктуры в объеме образца осуществляется теми же сходящимися пучками, но преломленными после прохождения ими границы иммерсии и образца. Структура пучка при преломлении существенно искажается. Конусы лучей, падающих в иммерсии под раз-

ными углами  $\theta$  к границе раздела, собираются на оси пучка на разном расстоянии  $f(\theta)$  от границы раздела. В результате рефракционных aberrаций фокус размывается и трансформируется в каустику (рис. 1а). Естественно, применение критерия Рэля к формированию акустических изображений микроструктуры в объеме образца неправомерно. Наряду с ним должна существовать оценка разрешения, обусловленного рефракционными aberrациями пучка в объеме исследуемого образца. Поскольку рефракционные aberrации возникают уже в рамках лучевых представлений, то для такой оценки можно с успехом использовать лучевую акустику. Лучевой подход применяется в данной работе для анализа пространственного разрешения при формировании изображений границ раздела в объеме образца. Следует подчеркнуть, что при малой глубине  $h$  залегания визуализируемой границы соединения:  $h \leq \lambda_\alpha$  ( $\lambda_\alpha$  — длина волны зондирующего ультразвука в образце), когда влияние рефракционных aberrаций мало, для оценки пространственного разрешения должен использоваться критерий Рэля (1).

ТЕОРИЯ

Рассматривается визуализация структуры внутренней границы соединения двух материалов, расположенной на глубине  $h$  и параллельной поверхности образца (рис. 1б). Эхо от границы раздела обеспечивается лучами, входящими в состав прошедшего в объем материала пучка. После преломления в образце преломленные лучи отражаются от внутренней границы, вновь выходят в иммерсию и принимаются фокусирующей системой. Из-за различий в характере преломления на границе иммерсия—образец преломленные лучи, идущие под различными углами к оси пучка, будут отражаться в разных точках отображаемой плоскости и придут на фокусирующий приемник с разными фазами. Опыт показывает, что максимальный эхосигнал от внутренней границы приходит на приемную систему, когда отображаемая плоскость совпадает с плоскостью параксиального фокуса в объеме образца. В этом случае основной вклад в формирование эхосигнала вносится лучами, прилегающими к оси пучка и приходящими на приемник со сдвигом фазы  $\Phi(\theta)$ , не превышающим величину  $\pi$ :

$$\Phi - \Phi_0 \leq \pi, \tag{2}$$

где  $\Phi_0 = \Phi(\theta = 0)$  — фаза осевого луча, приходящего по нормали к границе раздела. Такие лучи в падающем пучке образуют конус с эффективной апертурой  $\theta_{эфф}$ :  $\theta \leq \theta_{эфф}$ , а их точки отражения на отображаемой плоскости формируют на ней круг радиуса  $r_\alpha$  с центром в параксиальном фокусе  $F_0$ . Остальные лучи падающего пучка, отражаемые вне этого пятна, будут иметь фазу, быстро меняю-

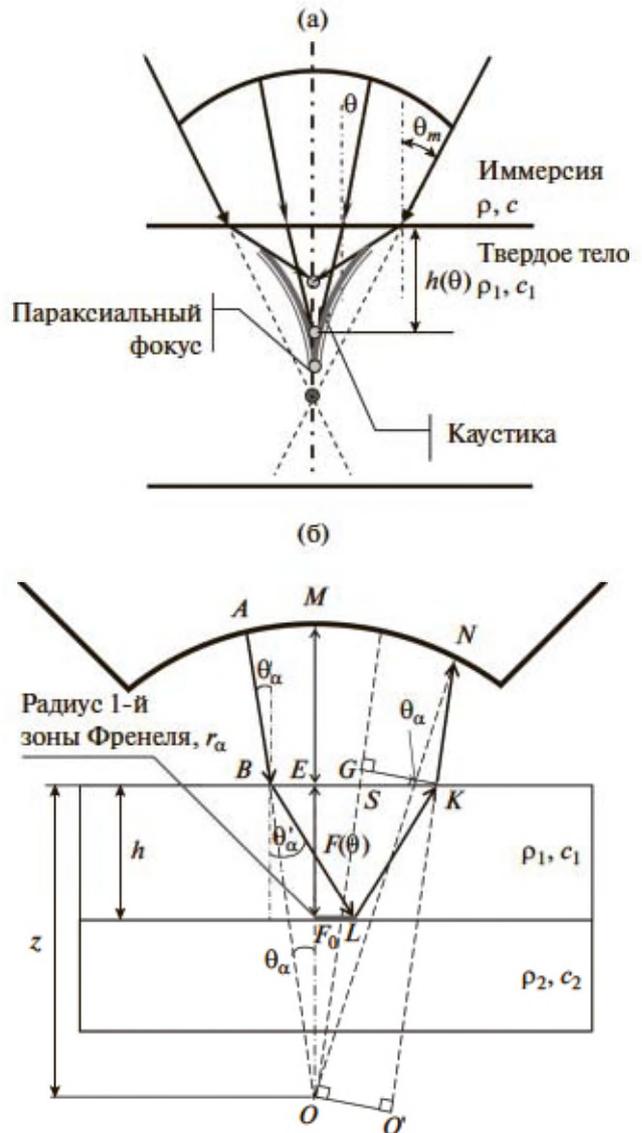


Рис. 1. (а) Формирование фокусированного пучка в объеме объекта при прохождении границы иммерсия—образец, (б) схема отражения от внутренней границы соединения в объеме объекта лучей, падающих по нормали и под углом  $\theta_\alpha$  к поверхности образца. Лучи звуковой моды  $\alpha$ , отраженные от границы и приходящие на приемник со сдвигом фазы  $\Phi$  относительно фазы осевого пучка  $\Phi_0$ , не превышающим величину  $\pi$ , формируют пятно радиуса  $r_\alpha$ , задающее пространственное разрешение при визуализации микроструктуры внутренних границ.

щую знак в зависимости от угла наклона. Их участие в формировании регистрируемого эхосигнала будет минимальным из-за взаимной компенсации их вкладов.

Пятно радиуса  $r_\alpha$  вблизи параксиального фокуса представляет собой 1-ю зону Френеля для излучения, отраженного от внутренней плоскости. Элементы объемной микроструктуры и внут-

ренней границы соединения оказываются различимы, только если находятся друг от друга на расстоянии большем  $r_\alpha$ . Соответственно, размер 1-й зоны Френеля дает оценку пространственного разрешения акустической фокусирующей системы, связанного с рефракционными aberrациями.

Величины  $\theta_{\text{эфф}}$  и  $r_\alpha$  определяются условием (2) из геометрии хода лучей при их преломлении и отражении. Расчет времени прихода на приемник отраженных лучей в зависимости от угла их наклона  $\theta$  позволит найти из соотношения (2) эффективную угловую апертуру и размер 1-ой зоны Френеля на отображаемой границе раздела и, соответственно, дать оценку пространственного разрешения при визуализации внутренних границ.

Рассмотрим сферический излучатель на рабочей частоте  $\omega$  и с радиусом кривизны  $R$  (рис. 16). Прием оптимального эхосигнала от границы, расположенной на глубине  $h$ , достигается смещением акустического объектива из фокального положения (фокус на верхней границе образца) по направлению к поверхности образца на величину  $z$ :

$$z_\alpha = h \frac{c_\alpha}{c}, \quad (3)$$

где  $c_\alpha$  — скорость распространения звуковой моды  $\alpha$  в объеме материала,  $c$  — скорость звука в иммерсии. Сдвиг фаз  $\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi_\theta$  на фокусирующем приемнике (рис. 16) между лучами, падающими и отраженными по нормали и под произвольным углом  $\theta$ , определяется временной задержкой  $\Delta t = t_1 - t_2$  прихода этих лучей на приемник; здесь индекс 1 относится к осевому лучу, индекс 2 — к лучу, идущему под углом  $\theta$  к оси пучка. Нормальный луч распространяется по отрезку  $MEF_0$  и обратно; наклонный луч идет по ломаной  $ABLKN$  (рис. 16). Согласно рис. 16, времена  $t_1$  и  $t_2$  на прохождении нормальных и наклонных лучей запишутся в виде

$$t_1 = 2 \frac{ME}{c} + \frac{2h}{c_\alpha}, \quad (4)$$

$$KN = \sqrt{R^2 - \left[ 2h \frac{c_\alpha}{c} \sin \theta \left( \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_\alpha}{c}\right)^2 \sin^2 \theta} - 1} \right) \right]^2} - h \frac{c_\alpha}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} - 2h \frac{c_\alpha}{c} \sin^2 \theta \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_\alpha}{c}\right)^2 \sin^2 \theta} - 1} \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \right). \quad (12)$$

Для объемной визуализации, как правило, используются длиннофокусные системы с небольшой угловой апертурой; в частности, в данной работе применялись линзы с  $\theta_m = 11^\circ$ . Соответственно, при расчете времен распространения  $t_1$  и

$$t_2 = \frac{AB}{c} + 2 \frac{BL}{c_\alpha} + \frac{KN}{c}, \quad (5)$$

где

$$ME = R - z = R - h \frac{c_\alpha}{c}, \quad (6)$$

$$AB = R - z / \cos \theta = R - h \frac{c_\alpha}{c} / \sqrt{1 - \sin^2 \theta}, \quad (7)$$

$$BL = h / \cos \theta'_\alpha = h / \sqrt{1 - \left(\frac{c_\alpha}{c}\right)^2 \sin^2 \theta_\alpha}. \quad (8)$$

Угол преломления  $\theta'_\alpha$  в образце определяется законом Снеллиуса на границе иммерсия—образец:

$$\frac{\sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta'_\alpha}{c_\alpha}. \quad (9)$$

Расстояние  $KN$  записывается как разность отрезков  $O'N$  и  $O'K$ , но  $O'K = OG = OS + SG$ . В результате для отрезка  $KN$  получаем:

$$KN = O'N - O'K = O'N - OS - SG = \sqrt{R^2 - O'O^2} - OS - SG. \quad (10)$$

Длина отрезка  $OS$  определяется из треугольника  $OES$  через угол  $\theta$  и катет  $OE$ , равный смещению  $z$ . Отрезок  $O'O$  равен  $GK$ :  $O'O = GK$ . Отрезки  $GK$  и  $SG$  определяются из прямоугольного треугольника  $SGK$  через угол  $\theta$  и гипотенузу  $SK$ , длина которой представляет собой разницу длин отрезков  $BK$  и  $BS$ , являющихся основаниями равнобедренных треугольников  $BLK$  и  $BOS$ . Длины отрезков  $BK$  и  $BS$  выражаются через глубину  $h$ , смещение  $z$  и углы падения и преломления  $\theta$  и  $\theta'_\alpha$ :

$$BS = 2z \sin \theta \quad \text{и} \quad BK = 2h \sin \theta'_\alpha. \quad (11)$$

Используя эти соотношения, получим для длины отрезка  $KN$  следующее выражение:

$t_2$  использовались разложения по малым значениям  $\sin^2 \theta$  и  $(c_\alpha/c)^2 \sin^2 \theta$ , и пренебрегались члены разложения старших порядков по ним

$$(1-x)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 + \dots, \quad (13)$$

где  $x$  принимает значения  $\sin^2\theta$  и  $(c_\alpha/c)^2\sin^2\theta$ . В результате такого расчета время задержки  $\Delta t$  луча в зондирующем пучке под углом  $\theta$  относительно центрального луча в пучке  $\theta = 0$ ,

$$\Delta t(\theta) = t_1 - t_2(\theta) = \frac{1}{4} \frac{h}{c_\alpha} \left( \frac{c_\alpha}{c} \right)^4 \left( 1 - \left( \frac{c}{c_\alpha} \right)^2 \right) \sin^4 \theta, \quad (14)$$

оказывается пропорциональным 4-й степени синуса угла падения  $\theta$ .

В соответствии с условием (2) эффективная угловая апертура  $\theta_{\text{эфф}}$ , ограничивающая конус лучей, образующих при отражении от внутренней плоскости 1-ю зону Френеля, удовлетворяет условию

$$\omega\Delta(\theta_{\text{эфф}}) = \omega[t_1 - t_2(\theta_{\text{эфф}})] = \pi \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует, что 1-я зона Френеля при отображении микроструктуры внутренней плоскости на глубине  $h$  формируется конусом лучей с эффективной угловой апертурой

$$\theta_{\text{эфф}} = \arcsin \left( \sqrt[4]{\frac{2\lambda_\alpha}{h} \frac{1}{1 - (c/c_\alpha)^2} \frac{c}{c_\alpha}} \right), \quad (16)$$

где  $\lambda_\alpha$  – длина продольной звуковой волны в образце на рабочей частоте зондирующего пучка. Для достаточно жестких образцов  $c/c_\alpha \leq 1/3$  выражение для эффективной угловой апертуры принимает вид

$$\theta_{\text{эфф}} \approx \arcsin \left( \sqrt[4]{\frac{2\lambda_\alpha}{h} \frac{c}{c_\alpha}} \right). \quad (17)$$

Радиус  $r_\alpha$  1-й зоны Френеля на внутренней границе раздела, когда она совпадает с плоскостью параксиального фокуса, выражается в виде

$$r_\alpha = h \operatorname{tg} \theta_{\text{эфф}} - h \frac{c_\alpha}{c} \operatorname{tg} \theta_{\text{эфф}}. \quad (18)$$

Раскладывая выражение (18) в ряд по степеням не выше  $\sin^4\theta$ , получим выражение для радиуса 1-й зоны Френеля в виде

$$r_\alpha \approx \frac{1}{2} h \left( \frac{c_\alpha}{c} \right)^3 \sin^3 \theta_{\text{эфф}} = \sqrt[4]{\frac{1}{2} h \lambda_\alpha^3}. \quad (19)$$

Из проведенного анализа следуют важные выводы о принципах формирования изображений в объеме образца:

1. Оптимальным для визуализации структуры в плоскости на глубине  $h$  является смещение линзы на расстояние  $z$ , даваемое выражением (3), когда отображаемая граница совпадает с плоскостью параксиального фокуса.

2. Изображение в объеме на глубине  $h$  формируется конусом лучей с углом раствора (16) или (17). Эффективная апертура определяется отношением скоростей звуковых волн, характеризующим эффекты преломления при входе зондирующего

пучка из иммерсии в образец, а также соотношением между длиной волны  $\lambda_\alpha$  зондирующего ультразвука в образце и глубиной залегания  $h$  отображаемой границы. С увеличением глубины эффективная апертура уменьшается пропорционально  $\sqrt[4]{h}$ .

3. Латеральное пространственное разрешение при формировании изображения структуры на глубине  $h$  определяется размером 1-й зоны Френеля  $2r_\alpha$  (формула (19)). В отличие от стандартного рэлеевского разрешения, задаваемого длиной волны  $\lambda_\alpha$  зондирующего излучения, разрешение при акустической визуализации в объеме пропорционально дробной степени длины волны в материале и глубины визуализируемой границы в объеме образца:

$$r_\alpha \sim \lambda_\alpha^{3/4} h^{1/4}. \quad (20)$$

Разрешение падает с ростом глубины, однако зависимость оказывается достаточно слабой, поскольку  $h$  входит в выражение для  $r_\alpha$  под знаком корня 4-й степени.

4. При малых глубинах залегания отражающей поверхности, сравнимых с длиной волны зондирующего ультразвука, эффекты рефракционных aberrаций оказываются пренебрежимо малыми. Латеральное разрешение в этом случае определяется дифракционными эффектами и описывается критерием Рэлея для зондирующего пучка в иммерсии.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально особенности взаимодействия фокусированных пучков с внутренними границами изучались на примере области клеевого соединения стеклокерамической и керамической  $ZrO_2$  пластинок толщиной 1 мм. Визуализация области соединения проводилась через объем  $ZrO_2$ , скорости распространения звуковых волн в котором составляют  $c_L \sim 7$  км/с и  $c_T \sim 3.5$  км/с [12–14].

Исследования проводились с помощью сканирующего импульсного акустического микроскопа SIAM-2 [15–17], разработанного в лаборатории акустической микроскопии ИБХФ РАН, с применением длиннофокусной линзы на рабочей частоте 100 МГц и с угловой апертурой  $11^\circ$ , ширина зондирующего импульса 40 нс. В качестве иммерсии использовалась дистиллированная вода. Зондирующий пучок входит в образец в виде сходящихся пучков преломленных продольных ( $L$ ) и поперечных ( $T$ ) волн. На практике для визуализации внутренней структуры чаще используются продольные волны, значительный вклад в амплитуду которых вносит параксиальная составляющая. Поперечные волны возбуждаются наклон-

ными компонентами пучка. За счет отсутствия осевой части их пучок обладает меньшей интенсивностью и большими рефракционными аберрациями. Однако поперечные волны обеспечивают лучшее пространственное разрешение за счет меньшей длины волны (в  $c_L/c_T$  раз). В нашем случае эффективное проникновение в объем  $ZrO_2$  позволяет использовать сходящиеся пучки обоих типов волн для визуализации одной и той же границы соединения и уверенно интерпретировать получаемые изображения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Оценка геометрии пучка на границе соединения

Используя выражения (17) и (19), была рассчитана эффективная угловая апертура пучка, участвующая в акустической визуализации границы соединения пластинок, и размер фокального пятна, формируемого данной апертурой на границе соединения. Фокусировка продольных волн акустической линзой 100 МГц на границе керамического соединения, расположенного на глубине  $h = 1$  мм в объеме  $ZrO_2$  ( $c_L \sim 7$  км/с), обеспечивается лучами внутри угловой апертуры  $7.5^\circ$ . Размер радиуса первой зоны Френеля составляет  $r_L \sim 114$  мкм. Диаметр этой зоны 228 мкм характеризует разрешающую способность линзы при визуализации границы соединения исследуемых керамических материалов.

Результаты теоретических оценок для сходящихся пучков продольных волн были сравнены с экспериментальными данными визуализации границы соединения.

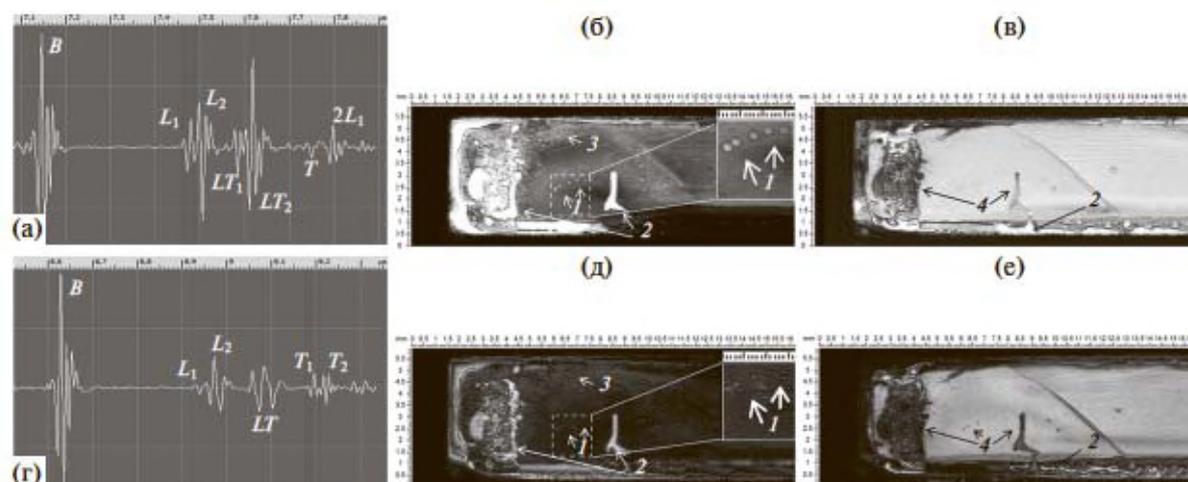
### Визуализация границы соединения

Визуализация области соединения керамических материалов производилась с поочередной фокусировкой на этой границе сходящихся пучков преломленных продольных ( $L$ ) и поперечных ( $T$ ) волн. С этой целью, согласно условию (3), фокусирующая система смещалась из фокальной позиции по направлению к передней поверхности образца на величину  $z_a$ , чтобы параксиальный фокус соответствующей упругой моды  $L$  или  $T$  оказался на границе соединения. В каждом положении эхограммы сигнала, отраженного от системы “керамика–клей–стеклокерамика”, включают парные  $L_1, L_2$  (для визуализации с использованием  $L$ -волн, рис. 2а) или  $T_1, T_2$  (для визуализации с использованием  $T$ -волн, рис. 2г) импульсы, отраженные от верхней и нижней границы клеевого слоя. На осциллограммах также присутствуют  $LT$ -сигналы, обусловленные отражением от границы соединения с конверсией мод, и  $2L$  – сигнал двойного переотражения продольных волн в объеме верхней пластинки. На рис. 2б и 2в представлены

акустические изображения ( $S$ -сканы) верхней (с пластинкой  $ZrO_2$ ) и нижней (со стеклокерамикой) границы клеевого слоя, полученные при фокусировке пучка продольных волн на границу соединения. Те же области отображаются на рис. 2д и 2е с использованием пучка поперечных волн, сфокусированных на границу раздела. Из сравнения эхограмм на рис. 2а и 2г видно, что  $L$ -пучки при их фокусировке на границу соединения обладают большей амплитудой по сравнению с  $T$ -пучками в случае их фокусировки. Различие составляет  $\sim 8$  дБ. Тем не менее, амплитуда  $T$ -сигналов оказывается достаточной для визуализации верхней и нижней границ клеевого соединения.

Градации серого на различных участках  $S$ -сканов отображают вариации величины сигнала, отраженного от областей границы раздела с различным качеством контакта. В областях, где адгезия отсутствует, возникает максимальный отраженный сигнал; на  $S$ -сканах такие области передаются в виде ярких белых участков. Наиболее темными выглядят области идеального контакта – значительная часть энергии падающего пучка проходит сквозь такой контакт в подлежащую область; соответственно, величина отраженного сигнала минимальна. Остальные области границы соединения на акустических изображениях ( $S$ -сканах) соответствуют участкам частичного контакта. Их степень яркости передает средний уровень нарушения адгезии внутри фокального пятна – чем выше яркость, тем меньше уровень локальной адгезии. Таким образом, дефекты адгезии (отслоения и воздушные пузырьки) отображаются на акустических изображениях яркими элементами на сером фоне областей хорошего и частичного контакта. Из представленных на рис. 2 акустических изображений видно, что в случае исследованного соединения керамических материалов точечные 1 и протяженные 2 участки потери адгезии, как и участки частичного контакта 3 наблюдаются только на верхней границе клеевого слоя с циркониевой керамикой (рис. 2б и 2д). На изображениях нижней границы (рис. 2в и 2е) видны лишь их акустические тени 4. Использование пучка поперечных волн для формирования акустических изображений (рис. 2д и 2е) позволяет за счет меньшей длины волны получать лучшее качество изображений при отображении как точечных, так и протяженных дефектов адгезии (элементы 1 и 2 соответственно на рис. 2д и их тени на рис. 2е).

Изображения точечных дефектов 1, полученные с использованием  $L$ - и  $T$ -пучков, позволяют экспериментально оценить пространственное разрешение, обусловленное рефракционными аберрациями при объемной визуализации  $L$ -пучками. Разрешение для акустических изображений, формируемых  $T$ -пучками, заметно выше. На врезке к рис. 2д, полученному с использованием  $T$ -пучка,



**Рис. 2.** Акустические изображения, полученные при фокусировке (а)–(в) продольных и (г)–(е) поперечных волн в области соединения керамических материалов. (а), (г) Эхограммы, полученные при фокусировке продольных и поперечных волн соответственно; (б), (в) и (д), (е) С-сканы верхней и нижней границ клевого слоя между керамиками, полученные  $L$ - и  $T$ -пучками соответственно. 1 – точечные дефекты, 2 – протяженные отслоения, 3 – участки частичного контакта, 4 – тени дефектов. Рабочая частота линзы 100 МГц. Поле сканирования  $16 \times 6$  мм.

видно, что размер точечных дефектов  $I$  составляет не более 100 мкм. Соответственно, реальный размер дефектов также не превышает эту величину. Такие размеры сравнимы с длиной волны продольного ультразвука в зондирующем  $L$ -пучке – в циркониевой керамике  $\lambda_L \approx 70$  мкм на частоте 100 МГц. Это означает, что формирование  $L$ -пучком изображений точечных дефектов адгезии  $I$  происходит за счет приема рассеянного излучения; размер этих элементов на акустическом изображении определяется диаметром фокального пятна (1-й зоны Френеля)  $2r_L$ . На врезке к рис. 2б видно, что соответствующие точечные дефекты отображаются продольными волнами как яркие элементы размером  $\approx 250$  мкм. Кроме того, на изображении два близко расположенных рассеивателя, расстояние между центрами которых не превышает 250 мкм, оконтурены и хорошо разделены друг от друга. Полученная величина дает экспериментальный размер 1-й зоны, а вместе с ним и пространственное разрешение  $L$ -пучка с учетом рефракционных aberrаций при отображении структуры внутренней плоскости на глубине 1-мм в объеме циркониевой керамики. Эта величина находится в хорошем согласии с полученной ранее теоретической оценкой разрешения  $\approx 230$  мкм. Таким образом, экспериментально был подтвержден теоретический подход для анализа пространственного разрешения при формировании изображений границ раздела в объеме образца.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен теоретический подход для анализа пространственного разрешения при

формировании изображений границ раздела в объеме образца. Оценка пространственного разрешения задается эффективной угловой апертурой и размером 1-й зоны Френеля, формируемой данной апертурой на внутренней границе соединения.

Эффективная апертура определяется отношением скоростей звуковых волн, характеризующим эффекты преломления при входе зондирующего пучка из иммерсии в образец, а также соотношением между длиной волны  $\lambda_\alpha$  зондирующего ультразвука в образце и глубиной залегания  $h$  отображаемой границы. С увеличением глубины эффективная апертура уменьшается пропорционально  $\sqrt[4]{h}$ .

Размер 1-й зоны Френеля  $2r_\alpha$  и, соответственно, разрешение при акустической визуализации в объеме пропорциональны дробной степени длины волны в материале и глубины визуализируемой границы в объеме образца (20). Разрешение падает с ростом глубины, однако зависимость оказывается достаточно слабой, так как  $h$  входит в выражение для  $r_\alpha$  под знаком корня 4-й степени.

Предложенный подход показал свою состоятельность и высокую сопоставимость с результатами экспериментальной визуализации внутренней границы соединения на примере соединения керамических материалов.

Работа выполнена на основе бюджетного финансирования в рамках темы № 1201253306.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nagy P.B.* Ultrasonic detection of kissing bonds at adhesive interfaces // *J. Adh. Sci. Technol.* 1991. V. 5. P. 619–630.
2. *Margetan F.G., Thompson R.B., Rose J.H., Gray T.A.* The interaction of ultrasound with imperfect interfaces: experimental studies of model structures // *J. Nondestr. Eval.* 1992. V. 11. P. 109–126.
3. *Vijaya Kumar R.L., Bhat M.R., Murthy C.R.L.* Evaluation of kissing bond in composite adhesive lap joints // *Int. J. Adhesion & Adhesives.* 2013. V. 42. P. 60–68.
4. *Oosterkamp A., Oosterkamp L.D., Nordeide A.* 'Kissing bond' phenomena in solid-state welds of aluminum alloys // *Welding Journal.* 2004. V. 8. P. 225–231.
5. *Marty P.N., Desai N., Andersson J.* NDT of kissing bond in aeronautical structures / *Proc. 16th World Conference on NDT. Aerospace.* 2004. 193. P. 1–8.
6. *Palmer D.D., Rehbein D.K., Smith J.F., Buck O.* Nondestructive characterization of the mechanical strength of diffusion bonds. I. Experimental results // *J. Nondestr. Eval.* 1988. V. 7. P. 153–166.
7. *Brotherhood C.J., Drinkwater B.W., Dixon S.* The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques // *Ultrasonics.* 2003. V. 41. P. 521–529.
8. *Nagy P.B., Adler L.* Ultrasonic NDE of solid-state bonds: inertia and friction welds // *J. Nondestr. Eval.* 1988. V. 7. P. 199–215.
9. *Rokhlin S., Hefets M., Rose M.* An ultrasonic interface wave method for predicting the strength of adhesive bonds // *J. Appl. Phys.* 1981. V. 52. P. 2847–2851.
10. *Kravcov A.N., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Morozov D.V., Shibaev I.A.* Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics // *Key Engineering Materials.* 2017. V. 722. P. 267–272.
11. *Kino G.S.* Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
12. *Morokov E.S., Levin V.M., Petronyuk Yu.S., Podzorova L.I., Il'icheva A.A., Lebedenko I.Yu., Anisimova S.V.* Acoustic microscopy for visualization and evaluation of ceramic–ceramic contact zone // *Physics Procedia.* 2015. V. 70. P. 652–655.
13. *Podzorova L.I., Titov S.A., Ilychova A.A., Mikhaylina N.A., Penkova O.I., Levin V.M., Morokov E.S.* Effect of hydrothermal influence on properties and microstructure of bioinert ceramic Yb–TZP // *Inorganic Materials: Applied Research.* 2016. V. 7. P. 74–78.
14. *Podzorova L.I., Il'icheva A.A., Pen'kova O.I., Alad'ev N.A., Baikin A.S., Kononov A.A., Morokov E.S.* Dispersion hardening of composites in the system aluminum oxide and cerium cation stabilized tetragonal zirconium dioxide // *Glass and Ceramics.* 2017. V. 74. P. 204–208.
15. *Levin V., Petronyuk Yu., Morokov E., Chernozatonskii L., Kuzhir P., Fierro V., Celzard A., Mastrucci M., Tabacchioni I., Bistarelli S., Bellucci S.* The cluster architecture of carbon in polymer nanocomposites observed by impulse acoustic microscopy // *Phys. Status Solidi B.* 2016. V. 253. P. 1952–1959.
16. *Khramtsova E., Morokov E., Lukanina K., Grigoriev T., Petronyuk Y., Shepelev A., Gubareva E., Kuevda E., Levin V., Chvalun S.* Impulse acoustic microscopy: A new approach for investigation of polymer and natural scaffolds // *Polymer Engineering and Science.* 2017. V. 57. P. 709–715.
17. *Petronyuk Y.S., Morokov E.S., Levin V.M.* Methods of pulsed acoustic microscopy in industrial diagnostics // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.* 2015. V. 79. P. 1268–1273.