

УДК 620.179.16÷534.1

**Рассеяние ультразвуковых колебаний на неоднородной  
границе при контроле неразъемных соединений**  
*Ultrasonic scattering by inhomogeneous boundary  
for evaluation of no dismantling junctions*

Баев А.Р., Асадчая М.В., Майоров А.Л., Сергеева О.С.  
*Baev A.R., Asadchaya M.V., Mayorov A.L., Sergeeva O.S.*

На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований получил дальнейшее развитие предложенный способ повышения чувствительности и производительности контроля качества границы неразъемного соединения материалов путем оптимизации апертур и фаз мнимых когерентных источников ультразвуковых волн, рассеянных одновременно дефектной и бездефектной поверхностью. Результаты численного моделирования, подтвержденные опытными данными, показали высокую эффективность использования асимметричных схем прозвучивания границы материалов и значительное повышение выявляемости дефектов сцепления материалов, включая даже тот случай, когда фазовый сдвиг между колебаниями, рассеянными дефектной и бездефектной поверхностью, существенно меньше по абсолютной величине, чем  $\pi$ . При этом эхо-режим прозвучивания объекта может быть реализован с использованием одного (наклонного) или нескольких преобразователей, ориентированных под разными углами приема рассеянных волн. Используя симметричную схему прозвучивания и направленное варьирование площади сечения акустического пучка  $S_0$ , показана принципиальная возможность оценки эквивалентной площади дефекта по характерному значению  $S_0^*$ , обеспечивающему минимум амплитуды рассеянного сигнала.

*On the base of theoretical analysis and experimental study the suggested method of sensitivity increasing and productivity of ultrasonic testing of the materials interface surface (MIS) quality by optimization of apertures and phases of imaginary coherent sources of ultrasonic waves, scatted in-time by defect and non-defect boundaries have been developed. Results of numerical modeling, supported by experimental data, shown high efficiency of asymmetrical schemes using for MIS sounding and substantial increasing of the interface materials flaw detection, including conditions when the absolute phase shift  $\Delta\varphi$  between ultrasonic waves scatted by defect and non-defect boundaries is nearly two time lesser, than  $\pi$ . So, the echo-regime sounding of objects to be evaluated can be realized by using of one or some number probes, directed at different angles for receiving of scatted waves. It is shown that by using symmetrical scheme of sounding and varying cross section of incident acoustical beam  $S_0$ , there is possibility to evaluate equivalent defect surface if  $S_0=S_0^*$  is proper to amplitude minimum of scatted beam.*

## Введение

При ультразвуковом контроле качества неразъемных соединений в условиях одностороннего доступа достаточно часто возникает проблема надежного выявления дефектов сцепления материалов и оценка их эквивалентной площади  $S_d$  [1]. Неразъемное соединение (металл – металл; металл – неметалл; неметалл – неметалл) может быть выполнено путем склейки, пайки, сварки, напыления и другими технологиями. Для неразрушающего контроля (НК) таких объектов используются объемные, поверхностные, пластинчатые моды, возбуждаемые импульсами или непрерывными колебаниями, с амплитудной и частотной модуляцией [2,3]. Для повышения отражающей способности дефектов предлагается использовать оптимальные углы излучения-приема, оценка же качества сцепления материалов производится по показаниям амплитуды отраженного (или прошедшего) сигнала  $A$ , его фазы  $\varphi$ , частоты  $f$ , спектра и др. [2]. Повышение надежности НК может быть достигнуто и за счет использования лазерной техники, позволяющей осуществлять зондирование объектов короткими импульсами, параметры которых весьма чувствительны к степени адгезии материалов. Подробный анализ известных методов НК указывает на их ограниченность, вызванную сложностью и невысокой производительностью акустических измерений. В особенности, это относится к объектам с изменяющейся структурой материала в объеме и на его поверхности, нестабильностью акустического контакта, снижающим надежность НК. Кроме того, требует совершенствования и методика оценки эквивалентной площади дефекта  $S_d$  сцепления материалов для случая, когда площадь акустического пучка (АП), падающего на контролируруемую границу материалов,  $S_a > S_d$ .

В настоящей работе, направленной на преодоление ряда недостатков, свойственных традиционным методам ультразвукового контроля, дано развитие предложенного способа повышения чувствительности и производительности контроля качества неразъемных соединений [4, 5] и его надежности. Этот метод основан на использовании особенностей формирования фронта АП, рассеянного одновременно дефектной  $S_d$  и бездефектной  $S_H = S_a - S_d$  поверхностью неразъем-

ного соединения (рисунок 1), где  $S_a = S_0 / \cos \beta$ , а  $\beta$  - угол падения АП на контролируемую границу материалов (КГМ). При этом выбираются такие условия излучения-приема ультразвуковых колебаний (УЗК) (направление прозвучивания, вид излучаемой (принимаемой) моды, частоты сигнала  $f$ ,  $\beta$  и угла падения  $\beta$  и приема  $\theta$ ), при которых сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  между пучками УЗК, рассеянными бездефектной и дефектной границей, максимален и близок к  $\pi$ :  $\Delta\varphi \rightarrow 2\pi m \pm \pi$ , где  $m$  - целое число.

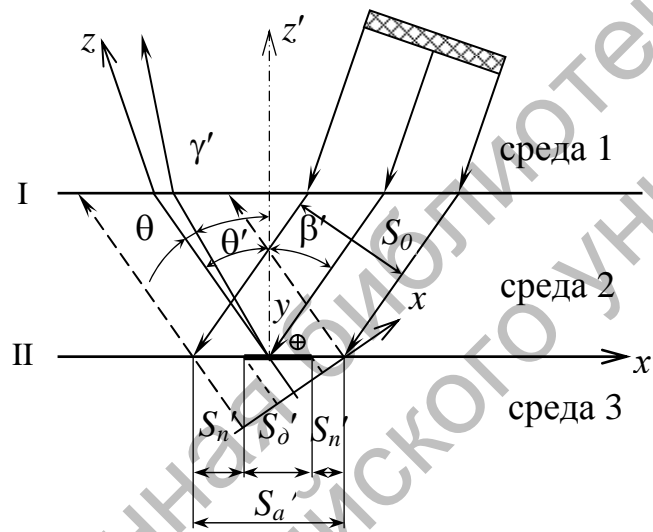


Рис. 1. Схема метода МКИ

Обобщенное уравнение акустического тракта ультразвукового дефектоскопа, описывающее прохождение акустического сигнала согласно представленной схеме измерений, имеет вид

$$A_{\Pi} \sim \int_{S_{\Pi\Pi}} \psi_4 dS_{\Pi\Pi} \int_{S_I} \psi_3 dS_I \int_{S_{II}} \psi_2 dS_{II} \int_{S_I} \Phi_{II} \psi_1 dS_I = \int_{S_{\Pi\Pi}} \psi_4 (F_3 F_2 F_1) dS_{\Pi\Pi}, \quad (1)$$

где подынтегральные функции для  $F_i$  имеют вид:

$$\psi_1 = D_{12} \chi_{\beta} \frac{1}{r_{12}} \exp[-i(\vec{k}\vec{r})_{12}], \quad \psi_2 = D_{21} R \chi_{\theta} \frac{1}{r_{21}} \exp[-i(\vec{k}\vec{r})_{21}], \quad \psi_3 = \chi_{\theta'} \frac{1}{r_{1M}} \exp[-i(\vec{k}\vec{r})_{1M}],$$

$D_{12}$  и  $D_{21}$  – коэффициенты прохождения по амплитуде УЗК, вводимых в объект и выходящих из него соответственно;  $\chi$  – функция направленности точечного источника на границе I (индекс  $\beta$  и  $\theta'$ ) и II или КГМ ( $\theta$ );  $\vec{r}$  – радиус-вектор дифрагирующего акустического луча, направленного от контактной поверхности до КГМ (индекс 12) и обратно (21), а затем далее – до приемника УЗК в точку М (1М);  $\psi_4$  – функция приема волн;  $\Phi_{II}$  – функция поля первичного источника УЗК колебаний на контактной поверхности объекта;  $R=R_0\exp[-i\Delta\varphi]$  – коэффициент отражения КГМ, в общем случае зависящий от координаты падения выделенного акустического луча.

Необходимо отметить, что важная задача диагностирования КГМ заключается в повышении чувствительности контроля, что, естественно, требует создания таких условий, при которых функция  $\mathfrak{S}=\lg|A_d/A_0|$  принимает максимальное значение, где индекс 0 соответствует бездефектной КГМ. Для этого необходимо решить систему уравнений относительно параметров  $p_i = \{\beta, \theta, \Gamma_{II}, \Gamma_{II}, t_{II} \dots\}$   $\frac{\partial \mathfrak{S}}{\partial p_i} = 0$  при

условии, что в точке экстремума  $\frac{\partial^2 \mathfrak{S}}{\partial^2 p_i} < 0$ , где  $\Gamma_{II}$  и  $\Gamma_{II}$  – геометрические параметры апертур источника и приемников УЗК, а  $t_{II}$  – длительность импульса. При постоянстве условий ввода УЗК в объект контроля определяющее значение на измерительную процедуру будет оказывать интегральная функция  $F_2$ , представляемая в виде (2) для случая, когда в области АП находится  $n$  дефектных участков с соответствующими коэффициентами отражения  $R_m$  и фазовым сдвигом  $\Delta\varphi_n$ :

$$F_2 = \sum_{m=1}^{m_0} \int_{S_n} D_{21} [R_m \exp(-j\Delta\varphi_m) - R_n] \chi_\theta \frac{1}{r_{21}} \exp(-j(\vec{k}\vec{r})_{21}) (dS_\partial)_m + \\ + \int_{S_n} D_{21} R_n \chi_\theta \frac{1}{r_{21}} \exp(-j(\vec{k}\vec{r})_{21}) dS_a = F_{2\partial} + F_{2H}. \quad (2)$$

При реализации методики контроля приемный пьезопреобразователь (ПЭП) может находиться в ближней, переходной или дальней зоне. Если коэффициент звукопреломления сред на границе I отличен от единицы, то это, естественно, приведет к искажению поля за счет эффекта рефракции и зависимости коэффициента звукопрозрачности

$D_{21}$  от угла падения лучей рассеянного АП. Как показывают предварительные исследования, путем выбора оптимальных условий прозвучивания представляется возможным не только нивелировать влияние этих факторов на проведение контроля, но и случаев повысить его надежность и чувствительность. Последнее достигается, например, путем использования в качестве информативного параметра не вводимую в объект волну, а трансформированную из нее моду – поперечную или продольную.

Необходимо отметить, что основные схемы прозвучивания объектов можно разделить на две основные группы – симметричные и асимметричные схемы. Причем к первой группе отнесем те из них, где прием рассеянных волн производится в окрестности акустической оси поля мнимых когерентных источников (МКИ)  $\{\theta'=0, \theta=0\}$ , построенных в отсутствие дефектности КГМ. Если же  $\theta' \neq 0$  или  $\theta \neq 0$ , то схема асимметричная.

Для удобства рассмотрим ситуацию, когда прием рассеянного КГМ поля производится в дальней зоне и среде, идентичной материалу объекта. При этом важной характеристикой “дефектности” КГМ, несущей информацию о его геометрических размерах, может служить амплитудный параметр  $A^*(\theta) = A(\theta)/A_0(\theta) = F_{2\partial}(\theta)/F_{2H}(\theta)$ . Так, если схема измерений симметричная, то

$$A^*(\theta) = \frac{A(\theta)}{A_0(\theta)} = \sum_{m=1}^{m_0} \left[ \frac{(R_\partial)_m}{R_H} \exp[-i\Delta\varphi_n] - 1 \right] \frac{(S_\partial)_m}{S_A} + 1. \quad (3)$$

В данной ситуации максимальная чувствительность измерений достигается при  $A^*(\theta) \rightarrow 0$ , что требует выполнения соотношений:

$$\sum_{m=1}^{m_0} \left[ \frac{(R_\partial)_m}{R_H} \cos \Delta\varphi_n - 1 \right] \frac{(S_\partial)_m}{S_A} + 1 \rightarrow 0; \quad \sum_{m=1}^{m_0} \frac{(R_\partial)_m S_m}{R_H S_A} \sin \Delta\varphi_n \rightarrow 0. \quad (4)$$

Если прием УЗК производится в окрестности  $\theta=0$  и  $\Delta\varphi_n \rightarrow \pm\pi$ , то из (4) следует:

$$S_{\partial a} = \sum_{m=1}^{m_0} \frac{(S_\partial)_m}{S_A} = (1 - A^*)(R_{\partial H} + 1)^{-1}. \quad (5)$$

Как видно из (5), для указанных выше условий амплитуда принимаемого сигнала представляет собой линейную функцию аргумента  $S_{\partial a}$ . Отсюда также следует принципиальная возможность оценки  $S_{\partial}$  путем изменения площади пятна АП до такого значения, при котором амплитуда сигнала принимает нулевое значение. Т.е. в том случае, когда  $c=a$  и амплитуда рассеянного сигнала  $A^* \rightarrow 0$ , то  $S_{\partial a} \rightarrow (1+R_{\partial}/R_n)^{-1}$ , и площадь дефекта может быть оценена по данным отражающей способности дефектной и бездефектной поверхности. Интересно, что аналогичная картина имеет место, когда приемный ПЭП имеет достаточно большую апертуру и находится в ближнем поле МКИ. Это имеет место, например, при контроле тонких двухслойных пластин на высокой частоте, где поле каждого  $j$ -го рассеянного пучка слабо расходящееся.

На рисунках 2 и 3 представлены данные расчета характерных картин эволюции поля рассеяния УЗК или диаграммы направленности МКИ для случая, когда изменяется относительный размер дефекта и его положение в области пятна АП, если  $\Delta\varphi = \pm\pi$ . Обращено внимание на особенности изменения амплитуды рассеянных на КГМ волн при фиксированных углах приема  $\theta$ , а также смещение углов экстремальных значений поля при варьировании  $S_{\partial a}$  и координаты дефекта  $x$ . Пусть  $R_{\partial n} = \text{const}$  и увеличивается площадь дефекта, центр которого расположен в окрестности  $x=0$  (рисунок 2). В этом случае, наряду с уменьшением амплитуды основного лепестка раскрытия поля МКИ, возрастает амплитуда боковых лепестков и происходит сдвиг их максимумов к центру. Эта тенденция сохраняется вплоть до значений  $R_{\partial n} S_{\partial n} = 1$ , при которых  $A = A(\theta \rightarrow 0) = A_0 \rightarrow 0$ , а изменения как амплитуд  $A_0$  и  $A_{1m}$ , так и их отношения – максимальные. Именно указанному условию соответствует однозначная связь между экстремальными значениями  $A_0$  и  $A_{1m}$  и угловым положением максимумов 1-го порядка, что весьма важно для отработки методики оценки эквивалентного размера дефекта. Дальнейший рост  $S_{\partial}$  сопровождается тенденцией “восстановления” первоначальной структуры поля и слиянием двух боковых лепестков в главный лепесток МКИ при  $S_{\partial} \rightarrow S_a$  ( $S_n \rightarrow 0$ ).

Проведено численное моделирование поля рассеяния для условий, когда модельный дефект находится в центре пятна АП,  $R_{\partial n} S_{\partial n} = 1$ , а относительный коэффициент варьируется в диапазоне  $R_{\partial n} = R_{\partial}/R_n = 9-0,1$ .

Установлено, что в широком диапазоне изменения площади дефекта функция направленности результирующего поля рассеяния МКИ практически неизменна в угловом диапазоне  $\theta_{M1} \geq \theta \geq -\theta_{M1}$ , заключенном между максимумами первого порядка  $\theta = \pm\theta_{M1}$ . Однако, чем больше  $R_{\text{дн}}$  отличается от единицы, тем больше амплитуда боковых лепестков низшего

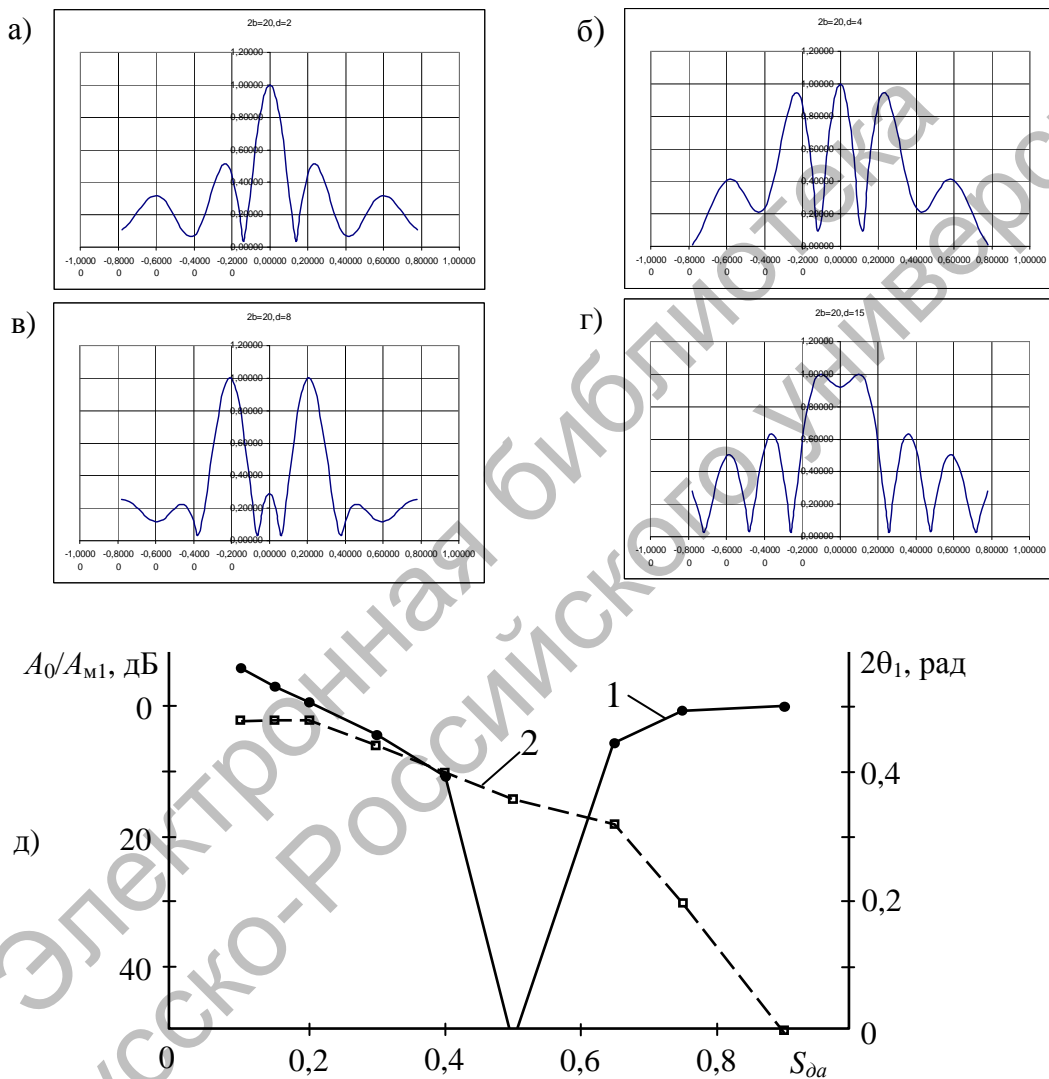


Рис. 2. Поле рассеяния МКИ (а-г) и его параметры (д) в зависимости от  $S_{da}$  при  $\Delta\varphi=\pi$ : д) 1 -  $A_{\theta=0}/A_{\theta=\theta_1}=A_0/A_M$ ; 2 - угол  $2\theta_1$  между двумя максимумами основного лепестка поля МКИ;  $f=1,8$  МГц,  $R_{\text{дн}}=-1$ ;  $a/\lambda=2,5$

порядка, включая  $A_{M2}$  (максимумы второго порядка) Так, например, при  $0,4 > R_{\text{дн}} > 2,3$   $A_{M2} > 0,5A_{M1}$ . Эти данные представляют интерес примени-

тельно к определению эквивалентной площади дефекта методом изменяющейся апертуры – по величине площади пятна АП  $S_a$  либо угла  $2\theta_1$  между максимумами  $A_{m1}$  раздвоенного главного лепестка поля рассеяния МКИ, при которых  $A_0 \rightarrow 0$ . С другой стороны (как и в предыдущем случае), повышение чувствительности акустического тракта может быть реализовано за счет настройки угла приема ПЭП на экстремумы боковых лепестков поля рассеяния опорного сигнала.

Необходимо отметить, что смещение дефекта относительно центра пятна АП даже при небольшой разнице между силой излучения источников МКИ, характеризуемой параметром  $R_{\partial n} S_{\partial n} = 0,25$ , приводит к существенному изменению структуры поля рассеяния, хотя амплитуда поля в окрестности  $\theta = 0$  постоянная (рисунок 2). Как видно, при приеме УЗК под характерными углами  $\theta$  относительное изменение амплитуды сигнала в несколько раз больше, чем измеренное при  $\theta = 0$  (~40%). При этом относительные изменения амплитуды сигнала-отклика, обуславливающие выявляемость дефектов, максимальны в том случае, когда угол приема УЗК  $\theta$  лежит в окрестности экстремумов боковых лепестков МКИ, определенных для опорного сигнала – т.е. полученного от бездефектной КГМ.

Исходя из данных численного моделирования, можно также сделать вывод о возможности использования схем измерений, основанных на одновременном измерении амплитуд поля рассеяния под двумя углами, которые определяются исходя из картины поля рассеяния опорного АП, например, в окрестности экстремумов низшего порядка. При этом ожидается повышение выявляемости дефектов, хотя несколько усложняется измерительная процедура. Анализируя картину эволюции исследуемого поля при изменении площади дефекта, а также его перемещении в области пятна АП, можно сделать вывод о том, что даже при существенном отклонении величины  $\Delta\varphi$  от  $\pm\pi$  (в несколько раз) представляется возможным достичь весьма высокой чувствительности контроля при использовании асимметричной схемы прозвучивания – как в отдельном режиме, так и совмещенном. Т.е. существуют характерные углы приема отраженных волн  $\theta_{ch}$ , которые могут быть использованы для получения максимально возможного изменения сигнала в измерительной схеме при сканировании объектов с дефектом. (Эти данные подтверждаются экспериментальными исследованиями, пред-



ставленными на рисунке 4). Если же  $R_{\partial a}=1$ , то при любом  $\theta$  зависимости  $A^*$  от  $x_L/2a$  сохраняют симметрию и подобны полученным ранее для  $\Delta\varphi=\pi$ .

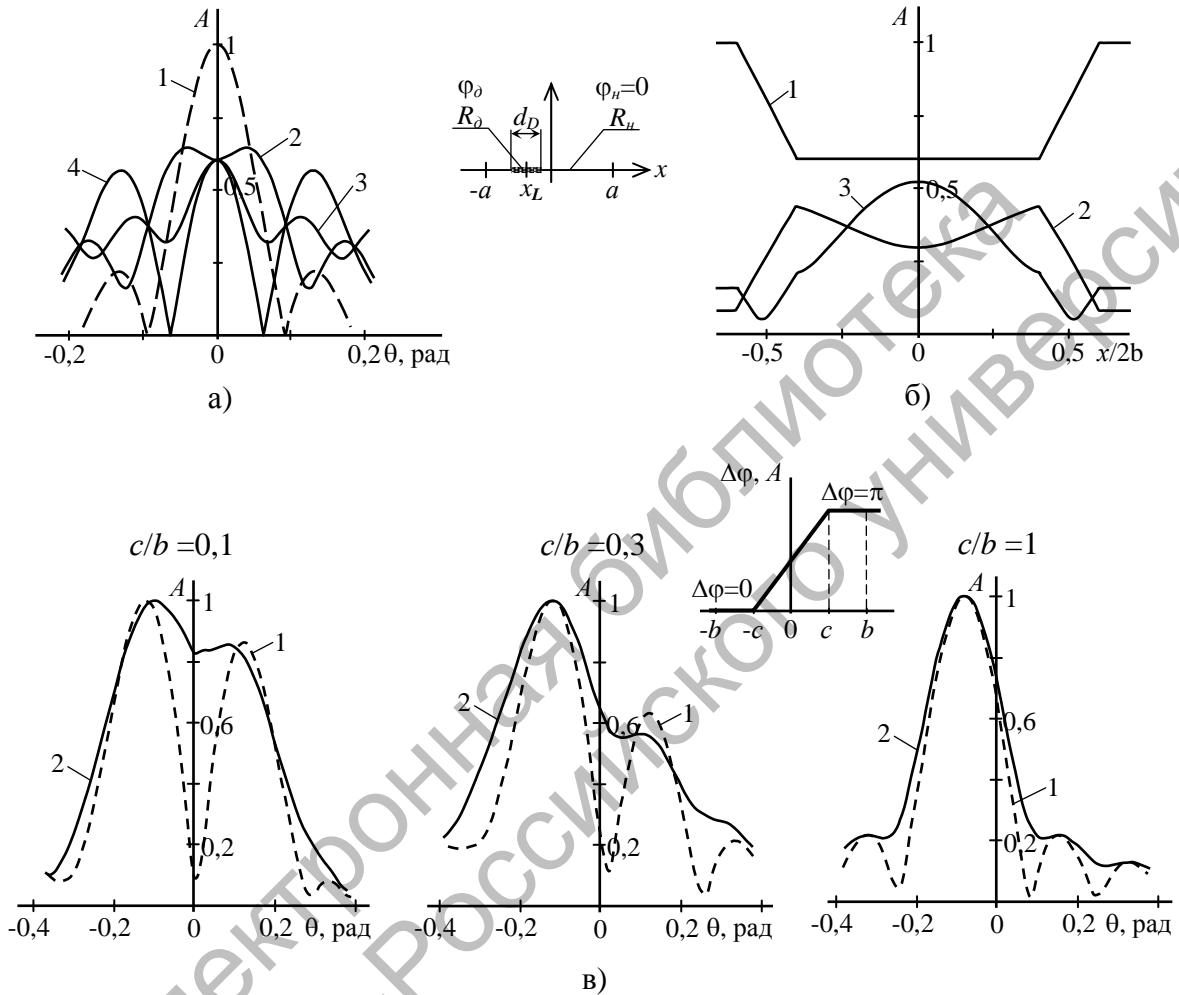


Рис. 3. Параметры поля МКИ в отсутствие переходной зоны по фазе и коэффициенту отражения (а, б) и при ее наличии (в):  
 а) амплитуда УЗК от угла приема волны для разных значений безразмерной координаты дефекта  $x/2b = -\infty$  (1), -0,4 (2), -0,2 (3), 0 (4) при  $\Delta\varphi=\pi$  и  $R_{\partial n}=-0,2$ ;  
 б) амплитуда УЗК от координаты положения дефекта для разных значений угла приема  $\theta$ , рад=0 (1), 0,1 (2), 0,13 (3) при  $S_{\partial a}=0,2$  и  $\Delta\varphi=\pi$ ;  
 в) амплитуда УЗК от угла приема волны для разных значений переходной по фазе и коэффициенту отражения зоны:  $\Delta\varphi=(x+c)\pi/2c$  и  $A=(x+c)(A_{\partial}-A_n)/2c$ ; при  $-c\leq x\leq c - R_{\partial n}=1$  (1); 8 (2)

Получены данные о характерных особенностях поведения поля рассеяния для случая относительного смещения дефекта радиусом  $r$  вдоль оси  $X$ , выходящей из центра АП радиусом  $r_0$ . Это поле сохраняет симметрию во всех плоскостях сечения, проходящих через ось исследуемой ДН под углом  $\phi$ , отсчитываемым относительно плоскости, проходящей через прямую  $X$ . Однако только в плоскости сечения с  $\phi = \pm\pi/2$  структура ДН не зависит от положения дефекта. В других же плоскостях сечения структура поля МКИ имеет отличие, которое возрастает с ростом расстояния между центрами дефекта и пятна АП и уменьшением абсолютного значения до нуля.

Следует ожидать, что анализируемый метод может быть эффективным и в случае, когда имеется переходная зона рассеяния УЗК, характеризующаяся плавным изменением  $\Delta\phi$  между дефектной и бездефектной отражающей поверхностью. В двумерном приближении был проведен расчет поля МКИ с переходной зоной  $2c$  между чисто дефектной и бездефектной поверхностью, где изменение фазы волны и амплитуды происходит согласно линейному закону (рисунок 3).

Как видно, рост “переходной” по фазе и коэффициенту отражения зоны вначале сопровождается потерей симметрии угловой зависимости  $A(\theta)$  относительно  $\theta=0$ , выделением одного из угловых максимумов кривой и относительным его ростом по отношению к ближайшему максимуму. При совпадении размеров переходной зоны и ширины акустического пучка ( $c=2b$ ) поле МКИ восстанавливает симметрию поля рассеяния, ось которой смещена относительно оси опорного сигнала. Как видно, при  $R_{дн} \gg 1$  зависимость  $A(\theta)$  близка к огибающей сравниваемой функции с  $R_{дн} \sim 1$ . При этом интересно, что ширина главного лепестка поля МКИ, взятая на уровне 0,3, увеличивается всего на ~20 % в диапазоне варьирования  $R_{дн}=1-8$ .

**Результаты экспериментальных исследований.** Данные теоретического анализа были экспериментально апробированы на основе использования методик, поясняемых на рисунке 4. При этом основное внимание акцентировалось на изучении возможностей: а) повышения чувствительности контроля путем использования асимметричных схем прозвучивания; б) оценки площади дефекта. Для проведения измерений использована традиционная аппаратура: для излучения и приема УЗК использованы блоки стандартного дефектоскопа, осцилло-

граф С1-71, а также измеритель временных интервалов И2-26, синхронизирующий работу измерительной системы и позволяющий анализировать форму недетектированного зондирующего импульса. Исследования выполнены на частотах 1,8–5 МГц. Контактующие материалы: плексиглас-алюминий; плексиглас-сталь; алюминий-сталь.

Исследование влияния  $S_{дн}$  на поле рассеяния продольных УЗК на моделируемой неоднородной границе проводилось согласно двум экспериментальным схемам, причем одна из них реализует отдельный режим прозвучивания и выполнена на базе полуцилиндрического образца из плексигласа. Его плоская поверхность контактирует через тонкий слой минерального масла со стальным образцом. В последнем имеются пазы разной ширины (рисунок 4а), поверхность под которыми свободная. Так что для выбранного угла падения волны на КГМ коэффициенты отражения от моделируемой дефектной (свободной) границы и бездефектной (скользящей)  $\Delta\varphi=180^\circ$ . Прием же УЗК производится под углом зеркального отражения ( $\theta$ ) и фиксированным углом  $\theta^*$ , соответствующим уменьшению амплитуды сигнала на 20 дБ, лежащим в окрестности минимума. Согласно другой схеме, излучение-прием УЗК производится в совмещенном режиме прямыми ПЭП, имеющими разный радиус. Если в первом случае поле МКИ измерялось практически в дальней зоне при постоянной апертуре первичного источника, то во втором – оба параметра варьировались, хотя акустическая база между ПЭП и отражателем оставалась постоянной.

Проверка высказанной выше идеи повышения чувствительности контроля объектов, для которых  $\Delta\varphi$  существенно меньше  $\pi$  ( $\sim 0,4-0,5\pi$ ), проведена путем облучения волнами Рэлея неоднородной границы как нормально ей, так и наклонно. Один образец представляет дюралюминиевый параллелепипед, часть боковой грани которого склеена встык со стальным параллелепипедом. У другого же образца из дюралюминия выполнен выступ, часть которого срезана в плоскости, проходящей перпендикулярно контактной поверхности (рисунок 4б).

Результаты проведенных исследований убедительно демонстрируют возможности развиваемого нами метода УЗ-контроля, основанного на принципах оптимизации апертур и фаз мнимых когерентных источников УЗК, отраженных от неоднородной границы. Пред-

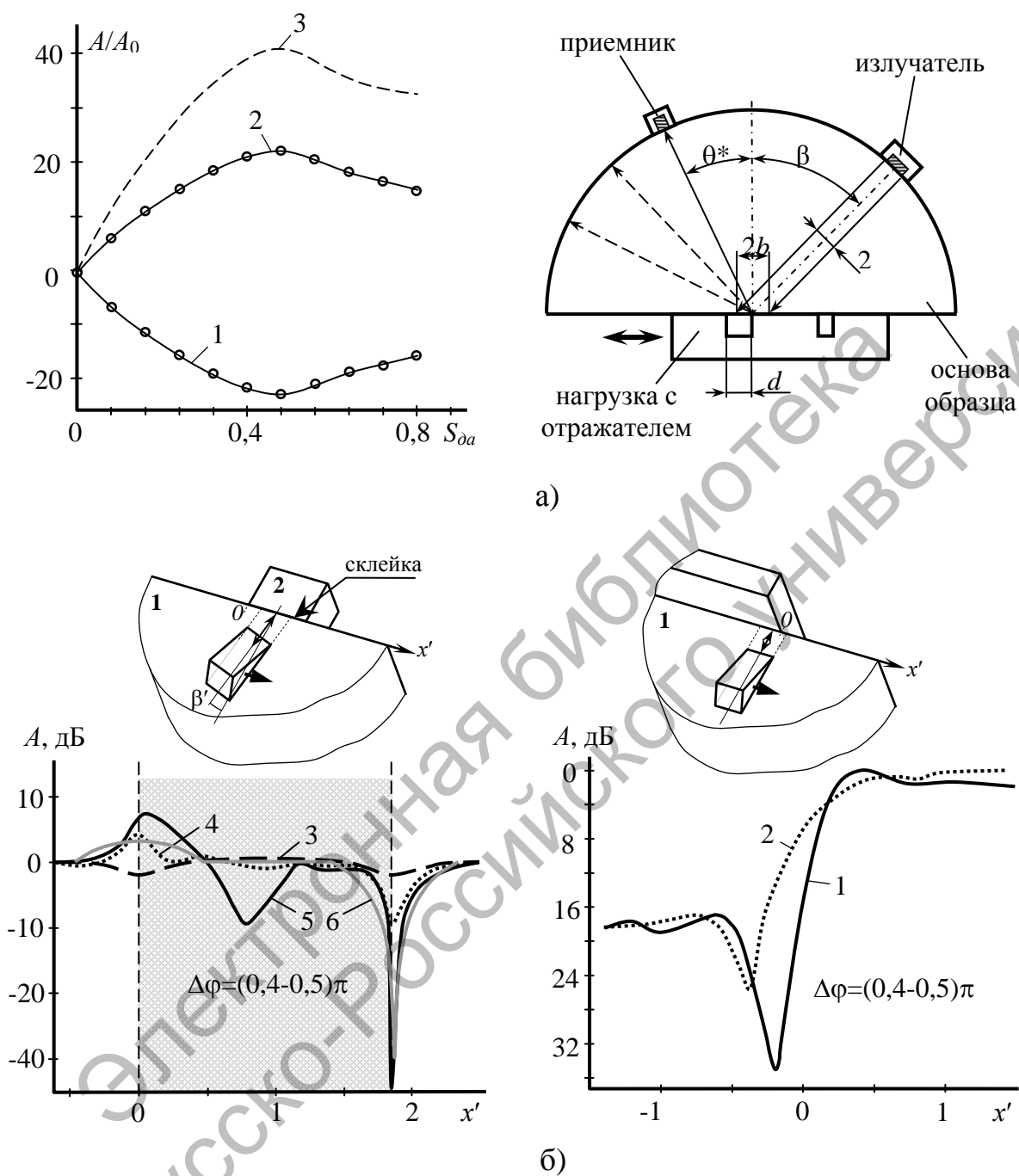


Рис. 4. Амплитуда рассеянных продольных волн в зависимости от относительной площади искусственного отражателя  $S_{da}$  (а) и волн Рэлея – от положения ПЭП (б):

- а) угол приема УЗК для невозмущенного поля МКИ  $\theta=0^\circ$  (1) (или  $\theta^*=\beta$ ) и  $\theta=\theta_1$ , соответствующее уменьшению амплитуды на 20 дБ (2);
- 3 – отношение указанных амплитуд;  $f = 5$  МГц; б) рассеяние ПАВ на КГМ образца с выступом (1, 2) и на КГМ, создаваемой склеиванием дюралюминия со сталью (3-6):  $\beta' = 0^\circ$  (1, 2, 3);  $5^\circ$  (4);  $7^\circ$  (5);
- 6 – теоретическая кривая;  $f$ , МГц = 5 (1); 1,8 (2-6)

ставленные на рисунке 4 данные свидетельствуют, прежде всего, о возможности повышения чувствительности измерительной схемы путем одновременного приема УЗК, рассеянных под двумя углами. Как видно, с увеличением  $S_{da}$  амплитуды сигналов, принятых под углом зеркального отражения и в окрестности ближайшего минимума, изменяются в противоположных направлениях, а их отношение возрастает практически на 40 дБ. Важным является и тот факт, что наблюдаемые экстремумы функций  $A_x/A_0$  лежат в окрестности  $S_{da}$ , отличающегося от расчетного не более чем на 10–15%, что свидетельствует о возможности реализации методик оценки эквивалентной площади дефектов сцепления материалов путем варьирования сечения падающего акустического пучка. При этом наибольшая эффективность и надежность оценки величины дефекта достигается в том случае, когда падающий на границу сред АП является слаборасходящимся, а приемный ПЭП ненаправленный и находится в дальней зоне.

Необходимо отметить, что в ряде случаев отклонение от указанных выше условий может привести к неоднозначности исследуемой зависимости. Это подтвердили данные исследований, проведенные при нормальном падении (приеме) УЗК на КГМ и варьировании диаметров искусственного отражателя в диапазоне 2–8 мм и пьезопластины в диапазоне 3–12 мм. В частности, при приеме УЗК преобразователем с достаточно большой апертурой в ближней (или переходной) зоне происходит суммирование сигналов от акустических лучей, рассеянных под углами, существенно отличающимися от нулевого (для МКИ), и характерный минимум поля будет нивелирован. Тем не менее, при специально подобранных значениях апертуры ПЭП и акустической базы представляется возможным не только обеспечить необходимую чувствительность измерительной схемы, но и производить оценку эквивалентной площади дефектов на КГМ.

Весьма важные для практики результаты исследований приведены на рисунке 4б, где используется асимметричная схема измерений, зондирование объекта осуществляется волной Рэлея, направленной как нормально КГМ, так и под некоторым углом. Выбор последнего определяется положением одного из ближайших минимумов поля опорного сигнала и направлением движения ПЭП. Эта схема измерений существенно проще и эффективнее представленной на рисунке 4а. Причем интересно, что для отраженного сигнала от склеенной и дефектной (не склеенной) границы  $R_{дн} \sim 1$ , а  $\Delta\varphi = 0,4-0,5 \pi$ . При этом изменение амплитуды рассеянного сигнала при сканировании достигает ~40 дБ.

Необходимо отметить, что представленные результаты исследований указывают на существование эффективного способа выявления и оценки дефектов соединения материалов. Предполагается использование рассмотренного выше эффекта в технике акустических измерений и для других приложений, включая контроль сплошности контактных пленок жидкости и пятна контакта сопрягающихся поверхностей, контроль качества акустического контакта; выявление дефектов, лежащих вблизи грубообработанной поверхности; определение степени неоднородности структуры материалов в поверхностных слоях; управление направленностью акустических колебаний и их гашением.

Следует обратить внимание на то, что при достаточно малых размерах дефектной области ( $\sim \lambda$  и менее) модуль коэффициента отражения  $R_d$  и фаза отраженной волны  $\Delta\phi$  могут отличаться от тех значений, которые получены для случая  $d_D \gg \lambda$  (этот вопрос требует проведения дополнительных исследований). Поэтому в ряде случаев, по возможности, следует повысить рабочую частоту контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2003. – 864 с.
2. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. – Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden, Colorado, 22-27 July 2007, V. 27A, pp. 279-285.
3. Kim H.-J., Song S.-J., Kim D.-Y., Kwon S.-D. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves. – Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden, Colorado, 22-27 July 2007, V. 27B, pp. 1066-1073.
4. Баев А.Р., Имбоден М., Асадчая М.В. Моделирование отражения ультразвуковых волн от границы раздела со смешанными граничными условиями / Сборник тезисов докладов 3-й международной научной конференции «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» г. Москва, 18-21 марта 2002г.
5. Баев А.Р., Асадчая М.В., Филиппов К.А., Юджел Б. Моделирование отражения акустического пучка от границы раздела сред со смешанными граничными условиями. // Весці, физ.-тех. серія, №2, 2004, стр. 85-90.

*Статья поступила в редакцию 26.02.14*