

УДК 620.179.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НЕОДНОРОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

*А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, *В. В. ЗАХАРЕНКО, **О. С. СЕРГЕЕВА*

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

*Белорусский национальный технический университет

**ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Минск, Могилев; Беларусь

UDC 620.179.16

MODELING OF REFLECTION OF VOLUME AND SURFACE WAVES BY AN INHOMOGENEOUS BONDERY

A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, V. V. ZAKHARENKO, O. S. SERGEYEVA

Аннотация

Проведено экспериментальное и численное исследование отражения объемных и поверхностных волн с неоднородной границей, что представляет интерес для ультразвукового контроля объектов сложного профиля, малых габаритов и со слоистой структурой. Предложена методика моделирования фазового сдвига волн и развит метод контроля качества сцепления материалов, основанный на оптимизации апертур и фаз мнимых источников упругих волн (УВ), отраженных неоднородной границей, позволяющий существенно повысить чувствительность выявления дефектов со слабой отражающей способностью путем приема рассеянной волны под углами минимумов 1-го и 2-го порядка поля опорного (мнимого) акустического пучка. Изучены особенности отражения, трансформации поверхностных акустических волн (ПАВ) и их прохождения через акустическую нагрузку, создаваемую твердым телом различной геометрии через скользящий контакт с образцом. Впервые получены зависимости коэффициентов отражения волны Стоунли K_{St} от угла наклона боковой грани $-60^\circ \geq \alpha \leq 60^\circ$ отражателя звука (ОЗ), что представляет интерес для разработки ультразвуковых устройств контроля свойств поверхности и выявления дефектов.

Ключевые слова:

диаграмма направленности, поверхностная акустическая волна, волна Стоунли, отражатель звука, сцепление материалов.

Annotation

An experimental and numerical investigation of the reflection of volume and surface waves by an inhomogeneous boundary is performed, which is of interest for ultrasonic testing of objects of a complicated profile, small dimensions, and with a layered structure. A technique for modeling the phase shift of waves is suggested and a method for controlling the quality of the adhesion of materials is developed, which is based on the optimization of the apertures and phases of imaginary sources of elastic waves (EW) reflected by an inhomogeneous boundary, which makes it possible to significantly increase the detection sensitivity of defects with a weak reflectivity by receiving a scattered wave at an angle of the minima of the first and of the second order of the

field of the reference (imaginary) acoustic beam. The features of reflection, transformation of surface acoustic waves (SAWs) and their passage through acoustic loading, created by a solid body of various geometry and sliding contact with the sample, are studied. Dependences of Stonely's reflection coefficients K_{St} on the slope angle $-60^\circ \geq \alpha \leq 60^\circ$ of the sound reflector (SR) were obtained for the first time, which is of interest for the development of ultrasonic devices for monitoring surface properties and detecting defects.

Key words:

directional pattern, surface acoustic wave, Stonely wave, sound reflector, material adhesion.

При проведении ультразвукового контроля объектов сложного профиля, малых габаритов, а также имеющих слоистую структуру, возникает ряд прикладных задач по оптимизации методик и средств измерений, позволяющих повысить их производительность и надежность без значительных затрат. В частности, это касается возможности использования особенностей формирования поля ультразвуковых волн (УВ), одновременно отраженных от участков контролируемого объекта, коэффициенты отражения которых отличаются как по абсолютной величине, так и по фазе; поверхностных акустических волн (ПАВ) отраженных от акустической нагрузки, создаваемой твердым телом различной геометрии, в контактном зазоре которого распространяются волны Стоунли [1].

Отражение УВ неоднородной границей

Несмотря на важность проблемы контроля качества сцепления различных неразъемных соединений типа металл-металл, металл-неметалл, полимер-полимер, известные методы, изложенные в [2], недостаточно надежны, либо громоздки и сложны в эксплуатации. Учитывая особенности дифракции рассеянных неоднородной границей волн, был предложен метод оптимизации апертур и фаз мнимых источников УВ [3], развитый в работе [4], позволяющий существенно повысить как чувствительность, так и производительность ультразвукового контроля. В общем случае результирующее акустическое поле при отражении УВ от границы сцепления материалов (разделенной на i_0 участков) представляется в виде суперпозиции полей i_0 источников

$$F_i \sim \int_{S_i} \chi_i(\theta) \exp(-jk_R r_{BM}) \frac{1}{r_{BM}} dS,$$

где $\chi_i(\theta)$ – функция направленности элементарного источника; k_R – волновой вектор; r_{BM} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения.

Сначала предполагалось, что количество участков, одновременно отражающих УВ, два (дефектный и бездефектный), а различие фаз между отраженными от них волнами близко к $\Delta\varphi \rightarrow \pi$. Именно в этом случае при приеме волны под углом отражения $\theta \rightarrow \beta$ и характерном положении сканирующего преобразователя (ПЭП), где β – угол падения волны, при выявлении дефектов наблюдалось изменение амплитуды опорного сигнала A_0



на порядок и более. При моделировании процесса отражения ПАВ обнаружена принципиальная возможность достижения такой же чувствительности при выявлении дефектов и в том случае, когда имеется отличие $\Delta\varphi$ от π . Дальнейшему развитию этой идеи и посвящена первая часть настоящей работы, в которой численно и экспериментально моделировались такие условия, при которых величина $\Delta\varphi$, для используемых УВ, была значительно меньше π , а изменение амплитуды при сканировании объекта было бы достаточным для выявления слабоотражающих звук локальных дефектов, включая дефекты слипания.

В настоящей работе для моделирования формирования полей мнимых источников УВ, одновременно отраженных от неоднородной границы, в качестве объекта исследований использовался преимущественно стальной образец в виде параллелепипеда (рис. 1), отражающая поверхность которого выполнена ступенчатой формы с характерной высотой ступенек $\delta_i \ll \lambda$, при которых фазовый сдвиг волн, отраженных от поверхностей смежных участков $\Delta\varphi_i \approx 2\pi f \delta_i / \cos \beta$, где λ – длина волны заданной упругой моды.

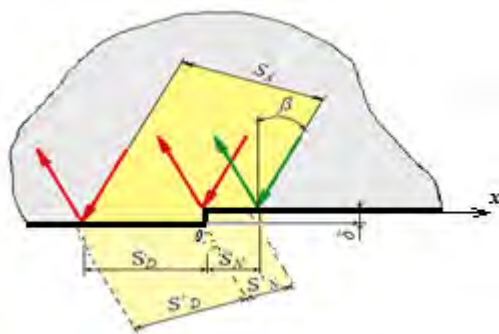


Рис. 1. Предложенная форма стального образца в виде параллелепипеда с отражающей поверхностью ступенчатой формы для моделирования процессов формирования акустического поля, отраженных от этой поверхности волн со сдвигом фаз $\Delta\varphi$

При проведении экспериментальных исследований в режиме эхо, объемные волны и ПАВ отражаются и принимаются одним и тем же преобразователем, либо дополнительным – установленным под заданным углом приема волн θ' . Для проведения экспериментальных исследований использовалась аппаратура приведенная в работе [3]. Некоторые результаты численных и экспериментальных данных, находящиеся в хорошем качественном соответствии, приведены на рис. 2 и 3.

Как обнаружено, установка угла приема ПЭП упругих волн, рассеянных неоднородной границей θ' , в положение, соответствующее минимумам или максимумам первого порядка $\theta' = \theta_{\pm}$ (которых два) поля мнимого источника. Опорного сила может приводить к существенному изменению амплитуды сигнала как объемной, так и поверхностной волны, достигающей 10 дБ и более, даже при $\Delta\varphi \sim \pi/18$, в процессе пересечения акустическим пучком модельной границы.

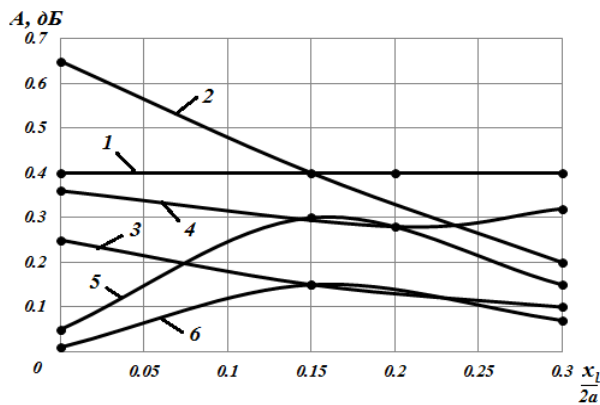


Рис. 2. Зависимость амплитуды рассеянной волны от положения координаты дефекта x относительно пятна АП на характер изменения поля мнимых источников при поперечном размере дефекта $l_D = 1/3$, где l – размер пятна АП; безразмерный параметр $x_l/2a$: $\Delta\varphi = \pi(1, 4)$; $\pi/2(2, 5)$; $\pi/8(3, 6)$; 1–3 – углы минимума первого порядка; 4–6 – углы минимума второго порядка

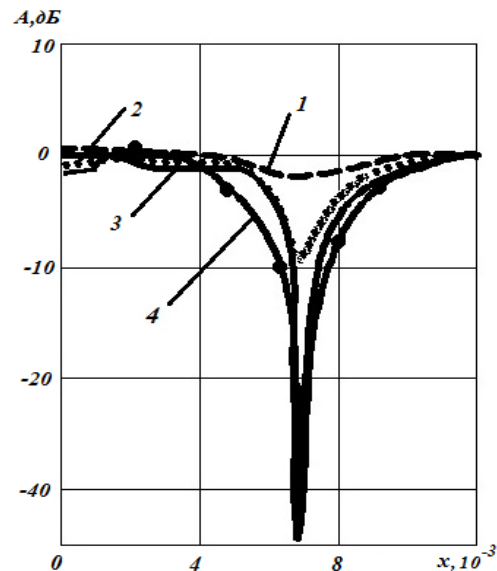


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды рассеянных волн Рэля модельной границы (рис. 1), в зависимости от положения ПЭП и сдвиге фаз между отраженными волн $\Delta\varphi \approx 0,5\pi$ при $f = 5$ МГц; угол приема рассеянных ПАВ на контактную поверхность $\theta' = 0^\circ(1)$; $5^\circ(2)$; $7^\circ(3, 4)$; 1–3 – расчетные данные; 4 – данные эксперимента (●)

Анализ полученных данных показывает эффективность использования рассмотренного метода для выявления слабоотражающих звуков дефектов сцепления материалов, которые в значительном числе случаев являются потенциально опасными. Причем одной из важнейших характеристик качества сцепления материалов (включая степень взаимной диффузии контактирующих материалов) является именно фазовая характеристика $\Delta\varphi$, определение которой традиционными способами существенно затруднено в реальных условиях ультразвукового контроля и зависит от качества акустического контакта, формы зондирующего сигнала, микро- и макрогеометрии поверхности.

Также получены численные зависимости (аксиальное приближение) амплитудных параметров полей рассеяния ДН для условий сканирования вдоль оси хобъекта акустическим пучком (АП) круглого сечения площадью S_A при наличии круглого дефекта радиусом r_0 и площадью S_0 , центр которого расположен под различным углом ψ по отношению к оси x на расстоянии r от центра акустической оси.

Как установлено, при $\Delta\varphi \rightarrow \pm\pi$ поле рассеяния АП в каждой плоскости сечения $\psi = const$ является симметричным относительно оси ДН независимо от положения дефекта, находящегося в области пятна АП. При

этом, если $\theta = \theta_0 = const$, то $\Phi(\theta_0, \psi)$ является анизотропной функцией. Интересно, что если дефект находится на оси x ($\psi = 0, \pi$), то поле рассеяния в плоскости $\psi = \pi/2$ совпадает с полем дефекта, центр которого совпадает с координатой $\{x, y, z\}=0$. В случае, когда $\Delta\varphi \neq \{0, \pm\pi\}$, то указанные свойства симметрия ДН отсутствуют. Как показывают численные расчеты, последняя претерпевает значительные изменения при наличии формы дефекта, существенно отличной от круговой, а также при фазовом сдвиге, лежащем в диапазоне $\Delta\varphi = |\pm\pi|$.

Отражение ПАВ от акустической (скользящей) нагрузки, создаваемой контактом твердых тел

Изучение этих вопросов представляет значительный интерес в плане разработки новых методов и средств контроля физико-механических свойств поверхностных слоев твердых тел, а также контроля дефектности сопряженных трущихся пар на наличие поверхностных дефектов и является развитием исследований работы [5]. Экспериментально изучены особенности отражения и прохождения ПАВ (первоначально возбуждаемой волны Рэлея) через область, создаваемую твердотельным отражателем звука (ОЗ) с различной геометрией угла наклона его боковых граней (рис. 4) и его поворота относительно направления прозвучивания. Некоторые новые результаты исследований, важные для практики, приведены на рис. 5.

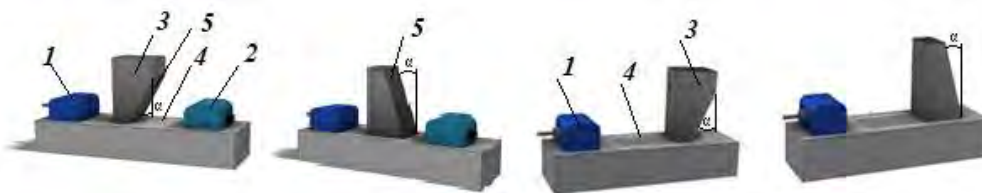


Рис. 4. Схемы экспериментального исследования прохождения и трансформации ПАВ с использованием контактных ОЗ различной формы: 1,2 – ПЭП; 3 – ОЗ; 4 – объект контроля; 5 – боковые грани; α – угол наклона боковых граней

Проведенный анализ акустического тракта в эхо и теневом режимах показывает, что амплитуда прямой проходящей волны (A_{pr1}), претерпевшей двойное отражение волны Стоунли в контактном слое и трансформированной из волны Рэлея (A_{pr2}), волны Рэлея, отраженной от передней грани ОЗ (A_{ref1}) и ПАВ, отраженной от задней грани ОЗ (A_{ref2}), связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} A_{ref1} &\sim K_R, & A_{ref2} &\sim D_{R,St} K_{St2} D_{St,R}, \\ A_{pr1} &\sim D_{R,St} D_{St,R}, & A_{pr2} &\sim D_{R,St} K_{St2} K_{St1} D_{St,R}, \end{aligned}$$

где $D_{R,St}$ и $D_{St,R}$ – коэффициенты прохождения ПАВ через переднюю и заднюю границы ОЗ; K_{St2} и K_{St1} – коэффициенты отражения волны Стоунли от задней и передней границы ОЗ соответственно; K_R – коэффициент отражения ПАВ от передней границы ОЗ; $K_0 = D_{R,St} K_{St2} D_{St,R}$ – характеризу-

ет амплитуду ПАВ на приемном преобразователе, отраженной от задней границы ОЗ.

Необходимо отметить, что коэффициенты отражения (или амплитуды отраженных сигналов) являются функциями угла наклона α боковых граней ОЗ к контактной поверхности. Исходя из экспериментальных данных и приведенных выше соотношений, впервые получены зависимости коэффициента отражения волны Стоунли K_{St} , а также соотношения амплитуд отраженной ПАВ от задней и передней границы ОЗ в зависимости от угла наклона передней грани, что весьма важно при проектировании малогабаритных ультразвуковых устройств для получения амплитудно-угловых характеристик и измерения скорости поверхностной волны, коррелирующих с физико-механическими свойствами поверхностного слоя металлоизделий [6].

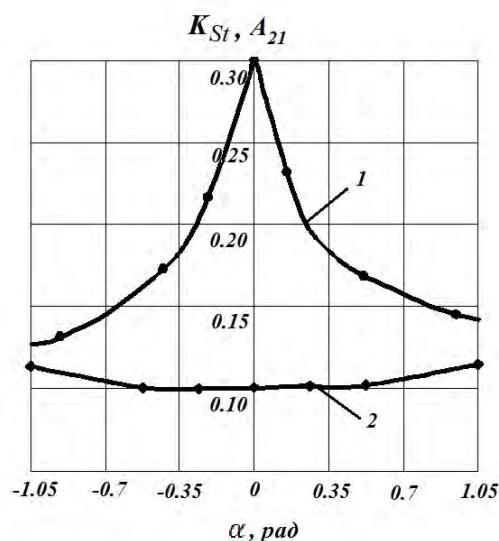


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения волны Стоунли K_{St} от угла наклона боковой грани ОЗ(1) и отношения амплитуды отраженной ПАВ от задней и передней границы ОЗ в зависимости от угла наклона передней грани (2)

Как видно, коэффициент отражения волны Стоунли K_{St} является монотонно убывающей функцией от абсолютной величины угла наклона боковых граней ОЗ. Причем его величина в исследованном диапазоне $|\alpha| < 0^\circ - 60^\circ$ изменяется практически в 2 раза. А в случае, когда угол наклона задней боковой грани $\alpha = 0$, варьирование наклона передней боковой грани в указанном диапазоне вызывает увеличение отношения амплитуд $A_{21}=A_2/A_1$, не превышающее 10–20 %, причем $A_{21} \approx 0,1$ при $\alpha = 0$.

Что касается коэффициента прямого прохождения ПАВ между излучателем и приемником ПЭП то его величина уменьшается не более чем в 2–3 раза в указанном угловом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stoneley, R.** Elastic waves at the surface of separation of two solids / R. Stoneley. – Proc. Roy. Soc. London, 1894. – P. 46–429.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
3. **Баев, А. Р.** Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. Ч. 1. Результаты экспериментальных исследований / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–17.
4. Рассеяние ультразвуковых колебаний на неоднородной границе при контроле неразъемных соединений / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 25–38.
5. Создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях / А. Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013. – № 1. – С. 42–55.
6. **Пат. 9911 РБ, МПК G 01 N 29/04.** Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн / А. Р. Баев, О. С. Сергеева, М. В. Асадчая, М. А. Тищенко ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № и 20130571 ; заявл. 08.07.13 ; опубл. 28.02.14 // Открытия. Изобретения. – 2014. – 4 с.