

УДК 620.179.161.534.1

Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница акустического контакта

Баев А.Р.¹, Пантелеенко Ф.И.², Захаренко В.В.², Размыслович Г.И.¹, Жаворонков К.Г.¹, Гиль Н.Н.¹

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 09.01.2018

Принята к печати 27.02.2018

Эффекты трансформации и распространения волн Рэлея и Стоунли представляют значительный интерес для расширения возможностей и совершенствования методов ультразвукового контроля и измерений. Цель данной работы заключалась в установлении влияния геометрических параметров тела акустической нагрузки и его положения на коэффициенты отражения и прохождения волны Стоунли и Рэлея и выявлении возможности использования результатов исследования для практических приложений.

На основе анализа акустического тракта и данных эксперимента установлена связь между измеряемыми амплитудными параметрами и коэффициентами прохождения и отражения поверхностных волн, а также отражательной способностью области контакта тела нагрузки в виде призмы через скользящую границу, которая достигает $\approx 32\text{--}34$ дБ. Впервые определены зависимости указанных коэффициентов от угла наклона одной из боковых граней призмы в диапазоне $0 \pm 45^\circ$, безразмерной толщины контактной прослойки (0–0,05) и ее ориентации относительно акустической оси.

Установлено, что эти коэффициенты преимущественно максимальны, когда призма прямоугольная. Коэффициент же отражательной способности при жестком контакте тел более чем на порядок меньше, а коэффициенты прохождения сравнимы по величине. Показана перспективность использования результатов исследования для контроля качества сцепления материалов при сварке, пайке, склейке, выявления дефектов в труднодоступных местах, а также для определения физико-механических свойств металлов с помощью предложенного способа создания опорного сигнала.

Ключевые слова: поверхностная волна, волна Рэлея, волна Стоунли, трансформация, отражение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Адрес для переписки:

Баев А.Р.

Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of
Belarus,

Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И.,
Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н.

Трансформация и рассеяния поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая
граница акустического контакта.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 28–39.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

For citation:

Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I.,
Lark K.G., Gill N.N.

[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load
to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary
of acoustic contact is sliding].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding

Baev A.R.¹, Panteleenko F.I.², Zakharenko V.V.², Razmyslovich G.I.¹, Lark K.G.¹, Gill N.N.¹

¹Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 09.01.2018

Accepted for publication 27.02.2018

Abstract

The effects of Rayleigh and Stoneley wave transformation and propagation are of considerable interest for the enhancement and improvement of ultrasonic methods evaluation and measurements. The purpose of this work is to determine the influence of the geometric parameters of the acoustic load body and its position on the coefficients of reflection and propagation of the Stoneley and Rayleigh waves and to identify the possibility of using the results of the study for practical applications.

Based on the analysis of the acoustic path and the experimental data, the relationship between the measured amplitude parameters and the coefficients of the propagation and reflection of surface waves, as well as the reflectivity of the contact region of the load body in the form of a prism through the sliding boundary, which reaches up to $\approx 32\text{--}34$ дБ, is established. For the first time, the dependence of these coefficients on the inclination angle of one of the prism lateral faces in the range of $0 \pm 45^\circ$, dimensionless thickness of the contact layer (0–0,05) and its orientation relative to the acoustic axis.

It is established that these coefficients are mainly maximal when the prism is rectangular. The coefficient of reflectivity in the hard contact of bodies is more than an order of magnitude less, and the coefficients of wave propagation – comparable in magnitude. The prospects of using the results of the study to evaluate the quality of adhesion of materials during welding, soldering, gluing, detection of defects in hard-to-reach places, as well as to determine the physical and mechanical properties of metals by the proposed method of creating a reference signal are shown.

Keywords: surface wave, Rayleigh wave, Stoneley wave, transformation, reflection.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Адрес для переписки:

Баев А.Р.

Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of
Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И.,
Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н.

Трансформация и рассеяния поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользя-
щая граница акустического контакта.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 28–39.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

For citation:

Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I.,
Lark K.G., Gill N.N.

[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load
to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary
of acoustic contact is sliding].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Введение

Все более широкое распространение в области неразрушающего контроля и ультразвуковых измерений находят поверхностные волны (ПАВ), включая волны Рэлея (ВР), Стоунли (ВС) и др., относящиеся к классу слабозатухающих волн. Энергия этих волн локализована в поверхностном слое (слоях) исследуемого материала глубиной h , не превышающей их длины волны $\lambda_{\text{ПАВ}}$. Амплитудные, фазовые, частотно-фазовые параметры таких ПАВ весьма чувствительны к изменению структуры исследуемого объекта, наличию поверхностных и подповерхностных несплошностей, качеству сцепления контактирующих материалов и др. [1–7]. При определенных условиях изменение граничных условий в области распространения ВР сопровождается появлением краевых волн, обусловленных трансформацией ПАВ в волны Стоунли, а также в объемные моды. В частности, в работе [4] упоминалось, что изменение граничных условий на пути распространения ВР обусловлено наличием на объекте прямоугольного выступа, что позволяет (в качестве физической модели) рассматривать объект как двухслойную среду с жестким акустическим контактом. Причем область в окрестности линии взаимного пересечения контактной поверхности объекта и передней грани выступа с пространственным параметром не более $l \sim \lambda_{\text{ПАВ}}$ служит источником трансформированных и рассеянных в объеме выступа краевых волн.

Отметим, что возбуждение ВР в однородном материале объекта со свободной границей и скоростью $C_{\text{ПАВ}}$ осуществляется при падении объемной волны, имеющей скорость C_1 , на поверхность объекта под углом $\beta = \arcsin(C_1/C_{\text{ПАВ}})$. Возбуждение же ВС на практике реализуется, как правило, путем трансформации ВР на акустической нагрузке, представляющей собой твердое тело, контактирующее с материалом подложки. Обобщенное граничное условие в области поверхности контакта двух тел $z = 0$, используемое для моделирования процессов распространения ВС (двумерная постановка), предложено в работах [8, 9] для компонент смещений $u^{(i)}_{x,z}$ и напряжений $\{\sigma^{(i)}_{xz}, \sigma^{(i)}_{zz}, \sigma^{(i)}_{xx}\}$:

$$\sigma_{zz}^{(1)} \Big|_{z=0} = \sigma_{zz}^{(2)} \Big|_{z=0}; \quad \sigma_{xz}^{(1)} \Big|_{z=0} = \sigma_{xz}^{(2)} \Big|_{z=0}; \quad (1)$$

$$u_x^{(1)} \Big|_{z=0} = u_x^{(2)} \Big|_{z=0} + \sigma_{xz}^{(2)} \Xi_t \Big|_{z=0}; \quad u_z^{(1)} \Big|_{z=0} = u_z^{(2)} \Big|_{z=0} + \sigma_{zz}^{(2)} \Xi_n \Big|_{z=0},$$

где Ξ_t и Ξ_n – коэффициенты, характеризующие эффективность передачи, соответственно, тангенциальной и нормальной составляющей напряжений через границу сред.

Полученное на основе решения 4 волновых уравнений относительно скалярного и вектора потенциала характеристическое уравнение вырождается в уравнение, описывающее распространение ВС при наличии «жесткого» контакта двух тел ($\Xi_t \rightarrow \infty, \Xi_n \rightarrow \infty$) или «скользящего» контакта ($\Xi_t \rightarrow 0, \Xi_n \neq 0$). Согласно общей методике для определения вещественного корня волнового числа k необходимо выполнение неравенства $k_t < k_n$ или $C_{St} < C_{Tn}$, где индекс T относится к поперечной моде. При реализации соответствующих граничных условий необходимое и достаточное условие существования ВС, заключается в выполнении неравенства:

$$X(\eta, \theta_1, \Xi_t, \Xi_n, g, \dots) \Big|_{\eta=1} > 1, \quad (2)$$

где $\eta = \left(\frac{C}{C_{t2}}\right)^2$, $\theta_1 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{n1}}\right)^2$, $\theta_2 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{t2}}\right)^2$, $\theta_3 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{n1}}\right)^2$, $g = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ – отношение коэффициентов Пуассона контактирующих материалов.

Согласно (2) моды ВС существуют и при контакте одинаковых тел через скользящую границу, т.е. при выполнении равенства:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = g = \mu_2 / \mu_1 = \rho_2 / \rho_1 = 1.$$

Однако в случае жесткой границы контакта двух одинаковых тел ПАВ трансформируется в объемные моды. При этом в работе [4] примером жесткого контакта тела акустической нагрузки (ТАН) с подложкой служил металлический образец с выступом, плоскость передней грани которого образует с контактной поверхностью угол $\gamma = 90^\circ$. Там же показано, что превалирующая часть энергии краевых волн, генерируемой непосредственно в области сопряжения указанных поверхностей, является энергией вертикально поляризованной поперечной моды.

Необходимо отметить, что в ряде технологических процессов соединения материалов (склейка, сварка, пайка и др.) граничные условия в области контакта материалов во времени претерпевают изменения – от скользящей до жесткой границы. Причем область в окрестности изменения или разрыва граничных условий можно рассматривать как самостоятельный вторичный источник излучения объемных волн, волн Стоунли и др. [5, 10]. С одной стороны, эти волны несут информацию о состоянии границы раз-

дела сред, а с другой – могут быть использованы для выявления дефектов в труднодоступных для традиционных методик местах. Отраженные от этой области волны могут создавать шумовой фон, препятствующий проведению контроля такого объекта, но в то же время служить для создания опорного сигнала при проведении измерений физико-механических свойств твердых тел глубины упрочненных слоев по данным скорости, амплитуды или спектра акустического сигнала ПАВ и др.

Таким образом, установление закономерностей трансформации ПАВ в краевые волны на ТАН, включая ВС, объемные и др., представляет как научный, так и практический интерес. Знание параметров акустического тракта таких систем весьма важны при выполнении методической части работы с целью разработки новых методик ультразвуковой диагностики свойств материалов по данным скорости нескольких мод и их спектральным характеристикам. Попытки аналитического описания указанных процессов трансформации ПАВ на акустической нагрузке наталкиваются на ряд трудностей, связанных с выбором корректной модели механизма преобразования смещений ξ_i и напряжений σ_{ik} в области условий проявления сингулярности передаточной функции. В этом случае несомненна роль экспериментального подхода.

В известных же преимущественно экспериментальных исследованиях основное внимание обращено на влияние состояния именно качества контакта сопрягаемых поверхностей при склейке, приложении силы давления. На фундаментальные же зависимости параметров акустического тракта от геометрии тела ТАН не обращалось должного внимания. К ним следует отнести коэффициенты прохождения ПАВ по амплитуде с последующе трансформацией в другую моду согласно схеме ВР→ВС (коэффициент D_{RS}) и ВС→ВР (D_{SR}), а также коэффициенты отражения волны Стоунли R_S и волны Рэлея R_R от соответствующих границ контакта ТАН с подложкой (рисунок 1). Эти вопросы представляют интерес с точки зрения как развития теоретической модели трансформации упругих мод на неоднородной границе, так и разработки усовершенствованных методик и средств ультразвуковых измерений и контроля.

Цель настоящей работы заключалась в разработке методики экспериментального исследования и установлении влияния геометрических параметров ТАН на ее отражательную способ-

ность и коэффициенты отражения, прохождения волны Стоунли и Рэлея, а также выявлении возможности использования результатов исследования для практических приложений, включая создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях и контроле поверхности и структуры материалов, что позволяет существенно повысить надежность и расширить возможности неразрушающего контроля.

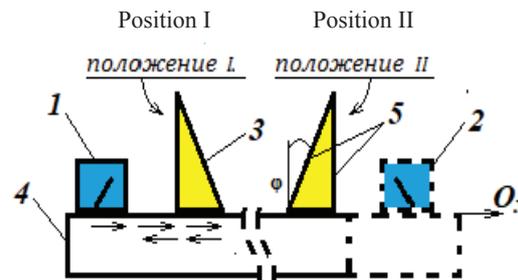


Рисунок 1 – Экспериментальная схема исследования отражения и прохождения поверхностных волн по подложке при наличии тела акустической нагрузки в виде призмы: 1 – излучающий пьезоэлектрический преобразователь; 2 – приемный пьезоэлектрический преобразователь; 3 – тело акустической нагрузки; 4 – подложка объекта; 5 – боковые грани призмы; φ – угол наклона боковых граней призмы

Figure 1 – Experimental scheme of investigation of reflection and propagation of surface waves on the basic solid in the presence of the body of the acoustic load in the form of a prism: 1 – emitting piezoelectric probe; 2 – receiving piezoelectric probe; 3 – the body of the acoustic load as a prism; 4 – the basic solid of the object; 5 – the lateral faces of the prism; φ – the angle of the lateral faces of the prism

Краткий анализ акустического тракта применительно к методике исследования

В качестве исследуемого объекта ТАН выбраны располагаемые в области прохождения ПАВ тела с наиболее простой геометрией и представляющие собой стальные призмы, контактирующие со стальной подложкой через контактную смазку, удельное акустическое сопротивление которой $R_{жс} = (\rho C_L)_{жс}$ более чем в 20 раз меньше импеданса контактирующих через нее стальных материалов $R_T = (\rho C_T)_T$, где индекс L относится к продольной, а T – поперечной моде (рисунок 1). Эффекты трансформации и рассеяния ПАВ имеют место в окрестности линии пересечения плоскости боковых граней призмы с контактной поверхностью (граница 1 и 2),

т.е. в области разрыва граничных условий. Причем одна из этих граней наклонена под углом к вертикали в варьируемом диапазоне $\varphi = 0 \pm 45^\circ$, а оппозитная ей грань образует угол $\varphi = 0$ с вертикалью. Рассматриваются два положения призмы относительно направления акустической оси, вдоль которой распространяются ПАВ, излучаемые их источником – пьезоэлектрическими преобразователем (ПЭП).

Проанализируем в двумерной постановке акустический тракт применительно к определению указанных выше коэффициентов прохождения и отражения ПАВ, а также введенного коэффициента \mathcal{K} , характеризующего отражательную способность ТАН. Последний определяется отношением показаний акустических сигналов или амплитуды отраженной ПАВ от 1-й, обращенной к источнику ПАВ границы (A_1), и оппозитной ей 2-й границы (A_2) (рисунок 1). При этом, как легко показать:

$$\mathcal{K} = A_2/A_1 = f_E (D_{RS})_1 (D_{SR})_1 (R_S)_2 (R_R)_1^{-1}, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют указанным границам контакта тела ТАН с подложкой, а f_E – поправочный коэффициент, учитывающий влияние расхождения и диссипацию ПАВ.

Если же прозвучивание объекта производится теньвым способом, а A_{T0} и A_T соответствуют амплитудам опорного сигнала в отсутствие ТАН и при наличии последней соответственно, то нормализованный коэффициент прохождения ПАВ через нагрузку примет вид:

$$N_T^* = A_T/A_{T0} = f_T (D_{RS})_1 (D_{SR})_2, \quad (4)$$

где f_T – корректирующий коэффициент, подобный f_E .

Положим, что измеренные в режиме эхо амплитуды отраженных сигналов от 2-й границы ТАН в отсутствие ее наклона A_{2E0} ($\varphi = 0$) и с наклоном A_{2E} ($\varphi \neq 0$), а измеренные в теньвом режиме – амплитуды A_{T0} и A_T соответственно. Тогда из (3) и (4) следует, что нормализованные коэффициенты отражения волны Стоунли R_S^* , а также звукопрозрачности D_{RS}^* и D_{SR}^* , полученные при развороте призмы на 180° , имеют вид:

$$R_S^* = -(R_S)_2/R_{S0} = A_{2E}/A_{2E0}; \quad (5)$$

$$D_{RS}^* = (D_{RS})_1/D_{RS0} = (A_T/A_{T0})_1; \quad D_{SR}^* = (D_{SR})_2/D_{SR0} = (A_T/A_{T0})_2. \quad (6)$$

Вследствие нарушения однородности граничных условий можно считать, что области, $x \subset x_i \pm \Delta x, z \subset z_i \pm \Delta z$, где $\{\Delta z/\lambda_{ПАВ}, \Delta x/\lambda_{ПАВ}\} < 1$ соответствуют расположению вторичных источников краевых волн, где x_1 соответствует отражающей волну Рэля границе 1, а x_2 – границе, отражающей волну Стоунли и трансформированной из ВР на границе 1. Так что закон сохранения энергии потоков акустических мод в двумерной постановке и пренебрежении диссипативными процессами представляется в виде:

$$\Pi_R = (\Pi_T + \Pi_L + \Pi_{SR}) (1 - D_R^{(0)} - R_R^{(0)})^{-1}, \quad (7)$$

где $\Pi = C \int_{S_r} w dS$ – поток энергии той или иной

моды через поверхность граничной области S , w – плотность этого потока; Π_T и Π_L – поток ТАН и энергии рассеянных на границах краевых поперечных и продольных волн; $D_R^{(0)}$ и $R_R^{(0)}$ – коэффициенты прохождения потока энергии ПАВ на боковые поверхности и отражения его от зоны разрыва граничных условий соответственно.

Учитывая полученные выше формулы (2–6), устанавливающие связь между упомянутыми выше параметрами акустического тракта и показаниями измеряемых амплитуд акустического сигнала ПАВ, были проведены экспериментальные исследования по определению зависимостей $\{\mathcal{K}, R_S^*, D_{RS}^*, D_{SR}^*\}$ от угла φ , разворота призмы на 180° , а также изменения толщины контактного слоя h .

Методические особенности эксперимента

На рисунке 1 представлена схема экспериментальных исследований. Моделирование граничных условий типа «скользящая граница» осуществляется путем размещения на стальной подложке стального образца в виде призмы через тонкий слой контактной смазки. Проводилась тщательная шлифовка контактирующих поверхностей, так что оцененная толщина контактной смазки h (минерального масла) при установке призмы в рабочее положение под постоянным усилием, создаваемым постоянными магнитами, не превышала 5 мкм. Т.е. выполнялось условие: $h_\lambda = h/\lambda_{ж} < 0,004$, или $h/\lambda_o < 0,01$, где $\lambda_{ж}$ и λ_o – длина продольной волны в жидкости и объекте соответственно. Размеры контактной поверхности призм $(8 \times 19) \cdot 10^{-6}$ м². Одна из боковых граней используемых стальных образцов ТАН образует

угол с вертикалью $\varphi = 0$, а оппозитная ей грань наклонена к вертикали под углом, варьируемом в диапазоне $\varphi = 0 \pm 45^\circ$. Для повышения надежности измерений путем устранения шумового фона, вызванного преимущественно краевыми объемными модами, на боковых поверхностях призмы выполнены канавки, играющие роль рассеивателей и покрытые поглотителем. Рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) рэлеевских волн 1,8 МГц. При проведении каждого измерения контактная среда, находящаяся вне области контакта ТАН с подложкой, тщательно удалялась.

Источником и приемником недетектированных импульсных сигналов служат электронные блоки генераторов УД2-12, осциллограф С1-71, измеритель временных интервалов И1-8, используемый для синхронизации и анализа параметров акустического сигнала, а также генератор стандартных сигналов, подаваемых на вторую развертку осциллографа для более точного определения амплитуды сигнала методом сравнения амплитуд.

На первом этапе исследований в режиме эхо измерялась отражающая способность моделируемой области контакта ТАН с подложкой преимущественно в зависимости от угла φ и толщины контактной смазки, а расчет искомым коэффициентов $\Xi_i = \{\mathcal{R}, D_{SR}^*, D_{RS}^*, R_S^*\}$ проведен путем использования формул (2)–(5). Как следует из них, при определении нормализованных коэффициентов представляется возможным исключить влияние корректирующих коэффициенты f_T и f_E на точность измерений.

Высота щелевого зазора регулировалась с помощью специальных подкладок, толщина которых измерялась с точностью 1 мкм. Для определения абсолютного значения коэффициента отражения волны Стоунли R_S был использован зеркально-теневой метод, позволяющий вначале найти отношение амплитуд ПАВ $A_{12} = A_{1T}/A_{2T}$, где A_{1T} соответствует прямой волне, прошедшей через зону контакта ТАН с подложкой на приемный ПЭП, а A_{2T} – двукратно отраженной от границы 2 и 1. Учтя, как и прежде, ослабление ВС в результате прохождения (при переотражении) ею дополнительного пути в зоне контакта путем ввода некоторого коэффициента ψ_d , получим, что $R_S = (A_{12}\psi_d)^{0.5}$. Коэффициент ψ_d определялся путем анализа изменения величины отношения амплитуд A_{12} в результате варьирования поперечного размера призмы и акустической базы про-

звучивания. Оцененная погрешность измерений не превышала 10–15 %.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований прохождения и трансформации ПАВ на образцах с моделируемой скользящей границей АНГ приведены на рисунках 2–4, где представлены нормализованные зависимости $\Xi_i(\varphi) = \{R_S^*, D_{SR}^*, D_{RS}^*\}$, а также \mathcal{R} . На рисунках 5–7 приведены некоторые предложенные схемы и конструкции устройств для акустических измерений, а также данные, свидетельствующие о возможности использования разработки для измерения глубины упрочненного термообработкой поверхностного слоя.

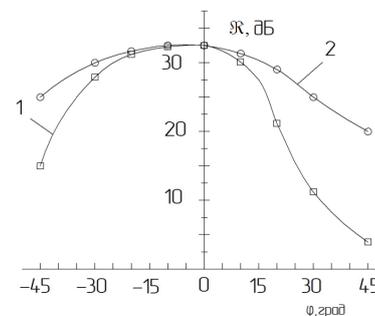


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражательной способности тела нагрузки (призмы) \mathcal{R} от угла наклона ее боковой грани: 1 – положение призмы I; 2 – положение призмы II (согласно рисунку 1)

Figure 2 – The reflectivity coefficient of the load body (as a prism) \mathcal{R}_E depending on the angle of inclination of its side face: 1 – the position of the prism I; 2 – the position II (according to the explanation in Figure 1)

Как видно, все представленные впервые зависимости, характеризующие свойства моделируемого объекта как ТАН или отражателя $\{\mathcal{R}, R_S^*\}$, так и коэффициентов прохождения ПАВ через границы 1 и 2, сопровождающегося трансформацией мод $N^* = \{D_{SR}^*, D_{RS}^*\}$ от φ , имеют максимум преимущественно в окрестности $\varphi = 0$. Как видно, левая и правая ветви этих угловых зависимостей относительно оси $\varphi = 0$ асимметричны. Причем для коэффициента, характеризующего отражательную способность тела призмы (формула (2)), величина $\mathcal{R} \approx (R_{R_2})(D_{RS_1})(D_{SR_1})(R_{R_1})^{-1}$ и достигает 32–34 дБ.

Наименьшее же значение $\mathcal{R} \approx 18\text{--}20$ дБ, имеет место в том случае, когда отражателем служит граница 2, а $\varphi > 0$. Как видно из хода функции $\mathcal{R}(\varphi)$, превалирующий вклад в ее изменение вносит именно коэффициент отражения ВР, который при $\varphi = 0$ равен $(R_s)_2 = (R_s)_1 = R_s$.

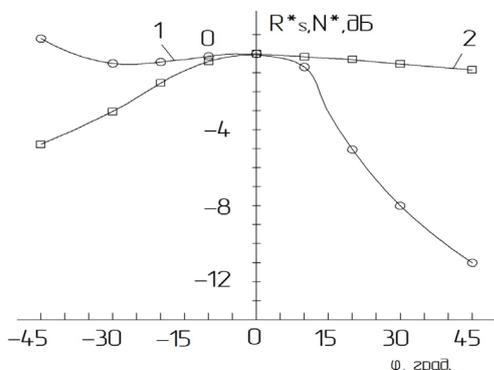


Рисунок 3 – Влияние угла наклона боковой грани призмы на нормализованный коэффициент отражения волны Стоунли R_s^* (1) и коэффициент прохождения границ контакта тела акустической нагрузки с подложкой N^* (усредненный (2)) при установке призмы в положение I и II, что поясняется рисунком 1

Figure 3 – Influence of the angle of inclination of the side faces of the prism on the normalized reflection coefficient of the Stonely wave R_s^* (1) and the transmission coefficient of the contact boundaries of the body of the acoustic load to the basic body N^* (averaged (2)) when the prism is in position I or II according to the explanation in Figure 1

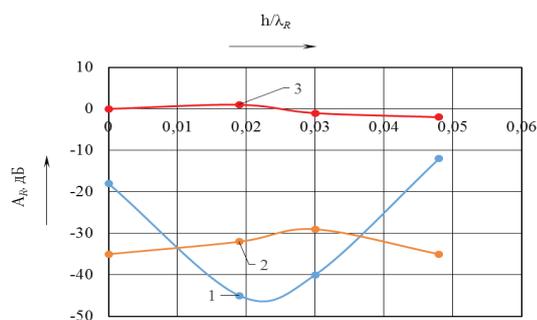


Рисунок 4 – Влияние безразмерной толщины контактного слоя жидкости $h^* = h/\lambda_R$ на амплитуду отраженной поверхностной волны от передней (1), задней (2) границы призмы, а также от ребра подложки (3), выполненной в виде параллелепипеда

Figure 4 – The influence of the dimensionless thickness of the contact layer of the liquid on the amplitude of the reflected surface wave from the front (1), back (2) prism boundary, as well as from the edge of the basic solid (3), made in the form of a parallelepiped

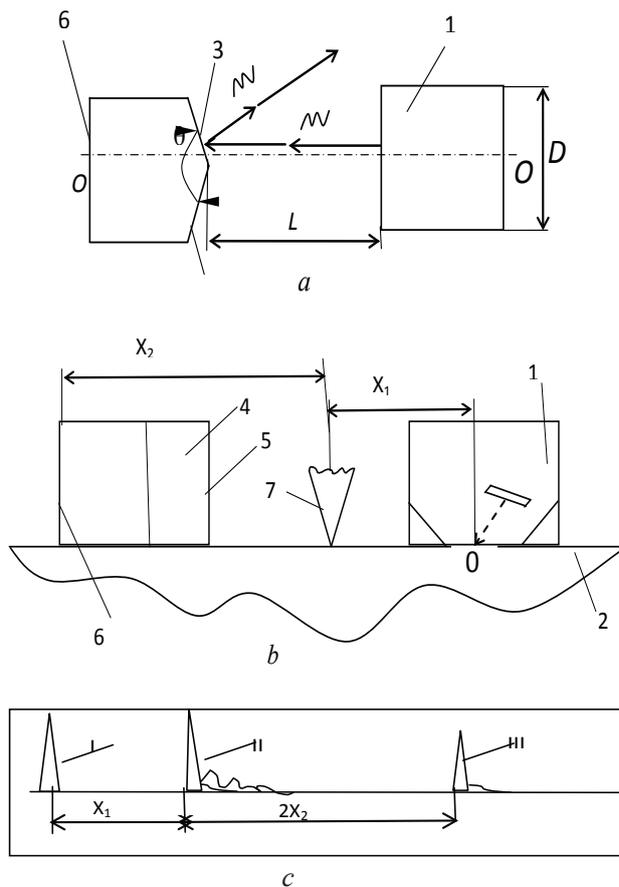


Рисунок 5 – Схемы использования устройства с твердотельным отражателем поверхностных волн для ультразвукового контроля и измерений по данным амплитудных и амплитудно-угловых параметров отраженного сигнала (a) (вид сверху) и по данным скорости поверхностной волны (вид сбоку), определяемой импульсно-фазовым методом с характерной осциллограммой (b): 1 – излучающий преобразователь; 2 – объект контроля; 3 и 4 – грани выступа тела отражателя, формирующие отражающую поверхность волны граница с вершиной 5; 6 – отражающая волна граница 2, формирующая опорный сигнал; 7 – приемный преобразователь; c: I – зондирующий, II и III – принимаемые преобразователем 7 импульсы

Figure 5 – Schemes of use of the device with a solid-state reflector of surface waves for ultrasonic evaluation and measurements by using amplitude parameters of the reflected signal vs. probe angle (a) (top view) and the velocity of the surface wave (side view) determined by pulse-phase method with characteristic oscillogram (b): 1 – emitting probes; 2 – test object to test; 3 and 4 – lateral sides of the reflector forming a reflecting surface waves boundary with the top 5; 6 – reflecting wave boundary 2, forming the reference signal; 7 – receiving probes; c: I – exciting, II and III – impulses receiving by probe 7

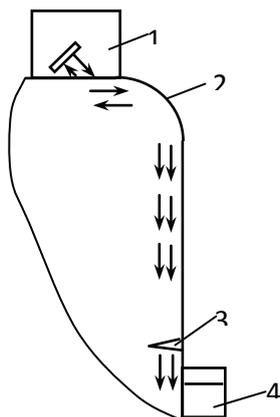


Рисунок 6 – Пример схемы использования ультразвукового устройства с твердотельным отражателем поверхностных волн для контроля объекта со сложным рельефом поверхности: 1 – преобразователь; 2 – объект контроля; 3 – поверхностная несплошность; 4 – отражатель поверхностных волн

Figure 6 – Scheme of using an ultrasonic device with a solidstate reflection of surface waves to test an object with a complex surface relief: 1 – probe; 2 – object to be tested; 3 – surface discontinuity; 4 – reflector of surface waves

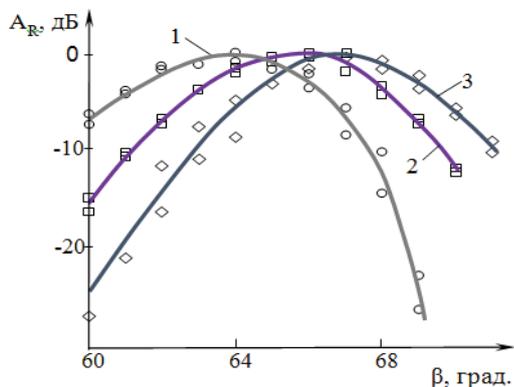


Рисунок 7 – Зависимости нормализованной амплитуды поверхностных волн, отраженных отражателем, от угла падения волны β на частоте 1,8 МГц: безразмерная глубина упрочненного слоя $h^* = h_\lambda = 0$ (1); 0,4 (2); 1,5 (3)

Figure 7 – Dependences of the normalized amplitude of reflected surface waves vs. the probe angle β when the depth of work-hardened by the currents of high-purity of steel layer is of $h^* = h_\lambda = 0$ (1); 0,4 (2); 1,5 (3) and when signal frequency is of 1,8 MHz

В результате исследований согласно приведенной выше методике было установлено, что определенная с погрешностью, не превосходящей 10–15 %, величина $R_S \approx 3,2$. Это позволяет по данным, приведенным на рисунке 2, оценить

абсолютную величину коэффициента отражения волны Стоунли R_S при изменении угла наклона как одной, так и двух граней призмы ТАН в исследованном угловом диапазоне. Это же касается определения абсолютной зависимости коэффициента прохождения ПАВ $N(\varphi)$, определяемой теньвым методом.

Что касается зависимостей нормализованных коэффициентов прохождения ПАВ через область с акустической нагрузкой, то $N = D_{RS}^*(\varphi)$ и $N^* = D_{SR}^*(\varphi)$ построены, как указывалось выше, путем разворота призмы ТАН на 180° относительно акустической оси. Установлено, что различие между ними по величине во всем исследованном диапазоне углов наклона одной из граней призмы не превышает половины погрешности измерений. Это позволило отобразить указанные зависимости одной «усредненной кривой» – $N^*(\varphi)$. Т.е. для углов $45^\circ \geq \varphi \geq 0$ зависимость $N^*(\varphi)$ монотонно убывает не более, чем на 10 %, а для $0 \geq \varphi \geq -45^\circ$ – на ≈ 70 –80 %. Таким образом, если угол наклона боковой поверхности призмы $0 \geq \varphi \geq 45^\circ$, то можно положить, что:

$$\frac{D_{RS}}{D_{SR}} = \left(\frac{D_{RS}}{D_{SR}} \right)_{\varphi=0} = \text{const.}$$

Что касается абсолютного значения функции прохождения N , то, как показывают данные эксперимента, в пределах указанной погрешности измерений (10–15 %) наличие ТАН в виде прямоугольной призмы сопровождается уменьшением N приблизительно в 3,3 раза.

Причина хода указанных выше угловых зависимостей обусловлена сложным характером трансформации ВР и ВС в окрестности границ ТАН, что поясняется уравнением баланса (6). Как следует из экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, энергией ВР, отраженных от передней границы ТАН, можно пренебречь. (Однако при проведении прецизионных ультразвуковых измерений этот фактор необходимо учитывать.) Как установлено, часть энергии ВР теряется при переходе этих волн на боковую поверхность призмы (граница 1), а часть – трансформируется в объемные моды. Подобный процесс имеет место и при трансформации волны Стоунли в волну Рэля на границе 2.

Используя подобную указанным методическим особенностям процедуру, были получены данные сравнения коэффициента отражательной способности ТАН и коэффициента отраже-

ния ВР от ребра параллелепипеда $(R_R)_{\text{П}}$, которое идентично отражению от бесконечной трещины. Установлено, что величина $(R_R)_{\text{П}}$ больше \mathcal{R} всего приблизительно на 5 дБ. Если же ПАВ проходит через зону контакта ТАН, отражается от ребра параллелепипеда и возвращается обратно, то эта разница достигает приблизительно 18–19 дБ. Увеличение безразмерного значения толщины контактного слоя $h_\lambda = h/\lambda_R$ (рисунок 4) приводит к росту этой разницы до 47–48 дБ, достигаемой в окрестности минимума исследуемой зависимости при $h_\lambda \approx 0,02$. В то же время на величину \mathcal{R} слабо сказывается варьирование h_λ в диапазоне от нуля до 0,05. Изменение же скорости ПАВ в контактном зазоре, измеренной импульсно-фазовым методом, может составить ≈ 4 –5 %.

Исходя из анализа акустического тракта и полученных опытных данных о коэффициентах прохождения и отражения ПАВ, можно сделать вывод о возможности проведения на практике контроля дефектности поверхности объектов как непосредственно расположенных в зоне контакта материалов, так и с противоположной стороны технологического объекта.

Необходимо отметить, что подобные указанным выше процессы трансформации волн имеют место и в том случае, когда объектом исследования служит твердое тело с выступом, реализуя модель жесткого сцепления поверхности подложки с ТАН. В этом случае, как показано в работе [4], преобладающая часть потока акустической энергии трансформируется на выступе в поперечную вертикально поляризованную T -моду. (Более подробный анализ механизма трансформации упругих мод представляется дать во второй части статьи.) Если же выступ имеет форму прямоугольной призмы, то коэффициент прохождения акустического сигнала, включающий трансформацию мод согласно схеме ПАВ $\rightarrow T$ -мода \rightarrow ПАВ, может быть представлен в виде:

$$N = N_2 = (D_{RT})_1 (D_{TR})_2 f_T$$

где D_{RT} и D_{TR} – коэффициенты трансформации ВР в T -моду и обратно; f_T – множитель, обуславливающий ослабление T -моды или краевой поперечной волны, распространяющейся в пространстве $x_1 < x < x_2$. При работе в режиме эхо аналогичный коэффициент:

$$\mathcal{R} = (D_{RT})_1 (D_{TR})_1 (R_T)_2 f_E [(R_{R1})]^{-1}.$$

Сравнительные экспериментальные данные показали, что коэффициент прохождения ПАВ по подложке с ТАН и скользящей контактной границей не более чем на 10 % превышает аналогичную величину при реализации жесткого контакта нагрузки с подложкой. Что касается отражательной способности зоны контакта ТАН с подложкой при жесткой границе между ними, то ее величина составляет всего $\mathcal{R} \approx 7$ –8 дБ. При реализации же скользящей границы (рисунок 2) отражательная способность ТАН более чем на порядок (25–26 дБ) больше, а амплитуда принимаемого акустического сигнала, отраженного от 2-й (отражающей) границы, превышает всего на 7–8 дБ.

Таким образом, при соединении одинаковых материалов методом склейки, пайки и др. характер изменения функции $\mathcal{R}(t)$ за характерное время $t = t_0$ может служить высокочувствительным показателем качества технологического процесса соединения одинаковых материалов. При этом отношение величин отражательных способностей $\mathcal{R}^* = \frac{\mathcal{R}_{t=0}}{\mathcal{R}_{t=t_0}}$ для указанных случаев превышает порядок.

Исходя из анализа механизма отражения и прохождения ПАВ, а также предварительных данных эксперимента, полученных для случая контакта ТАН из дюрали со стальной подложкой (и наоборот), следует предположить эффективность использования временной зависимости функции $\mathcal{R}(t)$ для контроля аналогичного технологического процесса и при другом сочетании соединяемых материалов ТАН и подложки.

Создание опорного сигнала применительно к ультразвуковым измерениям и контролю

При проведении ультразвукового контроля физико-механических свойств твердых тел по данным скорости ПАВ, ее амплитудно-частотным характеристикам, а также при выявлении поверхностных и подповерхностных дефектов требуется высокая точность измерений, существенно зависящая от шумового фона, вызванного указанными выше причинами. Для устранения этого фактора предлагаются некоторые схемы измерений, поясняемые на рисунках 5 и 6. В частности, предлагается использовать ТАН в качестве высокоэффективного отражателя ПАВ при определении, например, структуры чугунов, глубины упрочненного слоя, по данным скорости

ПАВ, коррелирующей с глубиной упрочненного слоя, где $C_{\text{ПАВ}} = C_{\text{ПАВ}}(h)$. Последняя может быть определена импульсно-фазовым методом по формуле: $C_{\text{ПАВ}} = L^*/\Delta t$, где L^* – акустическая база измерений, Δt – время распространения ПАВ (рисунок 5), либо по данным угла β^* максимума амплитуды отраженной от отражателя поверхностной волны, где $C_{\text{ПАВ}} = C_1/\sin\beta^*$.

Дополнительное снижение на десятки децибел шумового фона, попадающего в режиме приема на ПЭП, достигается путем выполнения передней отражающей ПАВ границы ТАН оптимальной формы. Например, эта граница может иметь вид треугольного уступа или выступа, обращенного к излучающему ПЭП (рисунок 6), угол которого 2ϕ образован двумя линейными участками отражающей ПАВ границы с вершиной в точку S . В этом случае превалирующая часть потока отраженной от границы энергии ПАВ выводится из зоны расположения ПЭП. Используя представление лучевой акустики, представляется возможным в первом приближении оценить соотношение между поперечными размерами призмы нагрузки $2b$, преобразователя $2d$ и его расстоянием s до вершины S . Так, если эта отражающая волна Рэлея граница имеет форму уступа, то указанное соотношение примет вид:

$$(s - b \operatorname{ctg} \phi) / d > 2 \operatorname{tg} 2 \phi,$$

а если граница имеет форму выступа, то:

$$-s / d > \operatorname{tg} 2 \phi,$$

где $s^* = s - b \operatorname{ctg} \phi$ – расстояние между передней гранью ПЭП и крайними (ближайшими) точками отражающей границы в виде уступа.

Как показывают численные оценки, при одинаковых параметрах $\{s^*/d, b/d\}$ наиболее компактной является конструкция отражателя с выступом, обращенным к излучающему волны ПЭП (рисунок 6). Как видно из приведенных формул, именно в этом случае влияние поперечного размера отражателя на его отражающую ПАВ способность существенно нивелируется. При этом представляется возможным в 1,5–2 раза и более сократить размеры конструкции ультразвукового устройства при одновременном уменьшении на десятки децибел соотношения шум-сигнал. Несомненно, это позволит значительно расширить номенклатуру контролируемых на качество их структуры объектов.

Отметим, что отражающая ПАВ граница 2 может иметь различное направление по отноше-

нию к акустической оси системы, а также разную форму. Так что ТАН может быть использована в качестве «механического девиатора» поверхностных волн, отклоняющего поток энергии ПАВ под некоторым углом к акустической оси. Во втором же случае – осуществлять фокусировку ПАВ перед границей акустической нагрузки 1. При этом отраженные волны от границы 2, выполненной в виде окружности с определенным радиусом r_0 , концентрируются на расстоянии от этой границы в окрестности своеобразного фокуса $F \approx r_0/2$. Использование таких схем управления направленностью ПАВ представляет интерес для контроля объектов в труднодоступных местах, имеющих изменяемую структуру поверхности и требующих повышенной стабильности и чувствительности измерений.

На рисунке 7 демонстрируется эффективность применения предложенного устройства для оценки глубины упрочненного слоя металла по данным корреляционной зависимости скорости ПАВ: $C_{\text{ПАВ}} = C_{\text{ПАВ}}(h) \sim (E_e/\rho_e)^{0,5}$, где E_e и ρ_e рассматриваются как эффективные значения модуля Юнга и плотности контролируемой среды, локализованной на глубину $h \approx \lambda_{\text{ПАВ}}$. Как видно, измерения могут производиться как импульсно-фазовым, так и амплитудно-угловым методом по формуле $C_{\text{ПАВ}} = C_1 (\sin \beta^*)^{-1}$, где β^* – угол падения волны на металл, обеспечивающий максимум амплитуды возбуждаемой ПАВ. Отметим, что в данном случае нет необходимости усложнять измерительную процедуру, используя два ПЭП, работающих в теновом режиме прозвучивания.

Заключение

На основе анализа акустического тракта получены соотношения, связывающие амплитудные параметры поверхностных волн, отраженных и проходящих через зону акустического контакта (тонкий смазочный слой) создаваемого стальной подложкой с телом акустической нагрузки в виде призмы и коэффициентами прохождения и отражения волн Стоунли через ее границы, а также отражательную способность тела нагрузки. Предложена методика и впервые экспериментально определены зависимости указанных коэффициентов при изменении угла наклона одной из боковых граней призмы в диапазоне $\phi = 0 \pm 45^\circ$, безразмерной толщины контактной прослойки (0–0,05) и ее ориентации

вдоль акустической оси измерительной системы и оппозитно ей.

Впервые экспериментально установлено, что представленные зависимости, коэффициенты отражения и прохождения волн Рэлея и Стоунли через переднюю (1-я граница) и заднюю (2-я) границы скользящего контакта тела призмы с подложкой (при одновременной трансформации мод), а также коэффициент отражательной способности, определяемый отношением амплитуд принимаемых отраженных акустических сигналов от 2-й и 1-й границы, являются асимметричными функциями от угла наклона боковой поверхности призмы и имеют преимущественно максимум в окрестности $\varphi \rightarrow 0$. Причем это отношение, измеренное в режиме эхо, принимает максимальное значение (≈ 32 – 34 дБ) в случае использования в качестве отражающего тела прямоугольной призмы, что более чем на порядок превышает аналогичный коэффициент, измеренный при наличии жесткого контакта тел, в то время как коэффициенты прохождения акустического сигнала сравнимы по величине.

На основании этих данных предложено использовать коэффициент отражательной способности в качестве высокоинформативного параметра, характеризующего качества соединения материалов пайкой, сваркой, склеиванием и др.

Определенные с погрешностью не более 10–15 % зеркально теневым и теневым способом максимальные значения коэффициенты отражения волны Стоунли и прохождения поверхностной волны через акустическую нагрузку составляют приблизительно 0,31 и 0,33 соответственно. Установлено, что угловые зависимости коэффициента прохождения поверхностной волны в пределах погрешности измерений совпадают при повороте призмы на 180° . Причем для $\varphi > 0$ этот коэффициент уменьшается не более чем на 1 дБ, а при $\varphi < 0$ – приблизительно на 4–5 дБ. Для коэффициента же отражения волны Стоунли наблюдается обратная зависимость: при $\varphi > 0$ его величина падает приблизительно на 12 дБ, а для $\varphi < 0$ его изменение не превосходит 1 дБ.

Предложены способы ультразвукового контроля и даны рекомендации по использованию результатов исследования:

– для определения физико-механических свойств поверхности материалов, включая определение глубины упрочненного слоя, по данным скорости поверхностной волны, измеренной

импульсно-фазовым и амплитудно-угловым методом, путем использования отражателей поверхностных волн, что позволяет сократить акустическую базу прозвучивания объекта в 1,5–2 раза и существенно расширить номенклатуру контролируемых объектов;

– для выявления дефектов, расположенных в труднодоступных местах и на объектах со сложным рельефом поверхности и неоднородной структурой, используя возможности фокусировки ПАВ путем выполнения границы 2 с заданным радиусом кривизны либо дефлекции волны механическим способом.

Полученные экспериментально данные могут быть использованы для оценки возможности диагностирования состояния трущихся поверхностей, для определения наличия на них поверхностных дефектов, а также контроля качества сцепления соединяемых материалов. Определенные коэффициенты отражения и прохождения ПАВ представляют интерес при теоретическом моделировании эффектов трансформации поверхностных волн их распространения.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора № Т17-159 от 18.04.2018.

This work was carried out with the partial support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract no. T17-159 of 18.04.2018.

Список использованных источников

1. Kruger, S.E. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound / A.J. Bakker, S.E. Kruger // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2007. – Vol. 27A. – P. 279–285.
2. Pecorary, C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // JASA. – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072.
3. Kim, H.J. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves / S.-J. Song Golden, D.-Y. Kim, S.-D. Kwon, H.-J. Kim // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2007. – Vol. 27B. – P. 1066–1073.
4. Баев, А.Р. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом / А.Р. Баев, О.С. Сергеева, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов //

Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 121–129.

5. Jerzak, W. Modeling Rayleigh and Stonely Waves and other Interface and Boundary Effects with the Parabolic Equation / W. Jerzak, W.L. Siegman., H.D. Collinz // *JASA*. – 2005. – Vol. 117. – P. 3497–3503.

6. Aladeddin, E. Combining NMR and Stonely Analysis for Better Estimation and Permeability in Carbonate Reservoirs / E. Aladeddin, H. Tchambaz and N. Al-Adani // Paper E. Proceedings, Formation Evaluation Symposium of Japan Society Petrophysist and Well Log Analysts, Japan. – 2005. – Chapter, 7 p.

7. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн / А.Р. Баев, О.С. Сергеева, М.В. Асадчая, М.А. Тищенко: пат. 9911 Респ. Беларусь, МПК (1023.09) G 01 N 29/04 / и 20130571; опубл. 28.02.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 4. – С. 36.

8. Аббакумов, К.Е. Влияние нарушения акустического контакта на распространение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств / К.Е. Аббакумов, Р.С. Конавалов // *Дефектоскопия*. – 2008. – № 3. – С. 52–58.

9. Abbakumov, K.E. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact / K.E. Abbakumov, V.A. Konovalov // Abstracts of 10th European conference on Non-destructive testing. – Moscow, 2010. – P. 173–175.

10. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А.М. Люткевич, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевальдыкин // *Контроль. Диагностика*. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

References

1. Kruger S.E., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27A, pp. 279–285.

2. Pecorary C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact. *JASA*, 2003, vol. 113, pp. 3065–3072.

3. Kim H.J., Song Golden S.J., Kim D.Y., Kwon S.D. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27B, pp. 1066–1073.

4. Baev A.R., Sergeeva O.S., Asadchaya M.V., Konovalov G.E. [Propagation of Rayleigh waves in solids with protrusion]. *Devices and methods of measurements*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).

5. Jerzak W., Siegman W.L., Collinz H.D. Modeling Rayleigh and Stonely Waves and other Interface and Boundary Effects with the Parabolic Equation. *JASA*, 2005, vol. 117, pp. 3497–3503.

6. Aladeddin E., Tchambaz H., Al-Adani N. Combining NMR and Stonely Analysis for Better Estimation and Permeability in Carbonate Reservoirs. Paper E. Proceedings, Formation Evaluation Symposium of Japan Society Petrophysist and Well Log Analysts, Japan, 2005, Chapter, 7 p.

7. Baev A.R., Sergeeva O.S., Asadchaya M.V., Tishchenko M.A.: *Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн* [Ultrasonic arrangement with reflector of surface waves]. Patent RB no. u20130571, 2014.

8. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. [Influence of the broken acoustical contact on propagation of Stonely waves at the boundary of solid mediums]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2008, no. 3, pp. 52–58 (in Russian).

9. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact. *Abstracts of 10th European conference on Non-destructive testing*, Moscow, 2010, pp. 173–175.

10. Lutkevich A.M., Zukove A.V., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. [Acoustical fields of the probes with small aperture. Transverse waves, radiated by rectangular source of the normal force]. *Kontrol. Diagnostica* [Control. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).