

УДК 620.179.161.534.1

Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект исследования – тело с выступом

Баев А.Р.¹, Майоров А.Л.¹, Асадчая М.В.¹, Коновалов Г.Е.¹, Сергеева О.С.²

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

²Белорусско-Российский университет,
пр. Мира, 43, г. Могилев 212000, Беларусь

Поступила 23.04.2018

Принята к печати 29.05.2018

Недостаток информации об особенностях процессов трансформации и рассеяния поверхностных волн в металлоизделиях с выступами, проточками, радиусными переходами и др. сказывается как на достоверности акустического контроля, так и на расширении его технических возможностей. Цель данной работы заключалась в уточнении механизма трансформации упругих мод и закономерностей формирования полей рассеянных краевых объемных волн в объектах с выступами разной геометрии, а также в установлении возможностей использования результатов исследований в области ультразвукового контроля и измерений.

Теоретически и экспериментально показано, что результирующее поле объемных мод в объекте с углом выступа $0-135^\circ$ и безразмерным радиусом радиусного перехода $0-10,2$ является суперпозицией поля сопутствующих и трансформированных на выступе из поверхностной волны краевой продольной и поперечной моды, существенно различающихся по направленности и амплитуде. Преобладающий по величине на ~ 10 дБ и более глобальный максимум поля поперечной моды, лежит в окрестности продолжения плоскости контактной поверхности, а обнаруженные при радиусном переходе выступа менее 1 локальные угловые осцилляции поля до $\sim 10-20$ дБ обусловлены влиянием отходящей поперечной моды, возникающей при прохождении вдоль поверхности передней грани выступа головной моды.

Данные исследований предложено использовать для ультразвукового контроля объектов сложного профиля на наличие слабо отражающих звук дефектов, изучение акустических свойств материалов по данным скорости краевых мод на разных частотах при удаленном расположении их от изучаемого объекта, а также – для излучения-приема поперечной моды разной поляризации.

Ключевые слова: поверхностные волны, поперечные волны, продольные волны, трансформация мод; поле акустического рассеяния.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

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., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.
Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект
исследования – тело с выступом
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 142–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

For citation:

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Kononov G.E. Sergeeva O.S.
[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to
ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study –
solid with ledge.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 142–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154



Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study – solid with ledge

Baev A.R.¹, Mayorov A.L.¹, Asadchaya M.V.¹, Konovalov G.E.¹, Sergeeva O.S.²

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

²*Belarusian-Russian University,
Mira Ave., 43, Mogilev 212000, Belarus*

Received 23.04.2018

Accepted for publication 29.05.2018

Abstract

The lack of information about the features of processes of the surface wave's transformation into volume waves and its scattering in metal objects with ledge, slots, grooves and the others is one of the obstacles to improve of the acoustical testing reliability and widening of technical application. The aim of this work was to study of mechanism of acoustical mode's transformation and determination the laws of the fields forming of scatted volume edge wave's in solids with ledge of different geometry and to suggest direction of the study application in area of acoustical testing and measurements.

The features of transformation of surface waves into edge transverse and longitudinal wave modes scatted and their fields forming in the volume of the object with ledge vs. its angle of the slope front surface side (0–135°) and a dimensionless transition radius (0–10,2) varied were studied. Theoretical analysis and experimental data shown that in general case the field of the edge transverse waves in the volume of ledge can be imagined as a superposition of the field of edge waves (scatted on ledge) and accompany waves too, radiated simultaneously with the surface waves to radiate. If dimensionless size of the ledge's transition radius lesser than 1 the resulting field of the edge transverse waves is the summary field of two sources. One of them (with small aperture) is localized in the vicinity of the place of intersection of contact surface with ledge's front side surface. As it was found, the second source of the edge transverse waves – the edge head longitudinal waves to appear in the results of transformation of surface waves on the ledge's radius transition. The structure of the edge acoustic fields including their extremes vs. ledge's angle and its radius transition, position of the surface wave's probe were experimentally studied and theoretically analyzed.

Some directions of the results of researches using are the next: a) ultrasonic testing of hard-to-make technological objects in which defects have low sound reflection; b) ultrasonic structure diagnostics of solid (specimens) set far from the ultrasonic by using edge volume transverse and longitudinal modes; c) creation of new ultrasonic arrangements to sound and to receive transverse waves of different polarization.

Keywords: surface waves, transverse waves, longitudinal waves, mode's transformation, field of acoustic scattering.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

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., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.
Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект
исследования – тело с выступом
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 142–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

For citation:

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Konovalov G.E. Sergeeva O.S.
[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to
ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study –
solid with ledge.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 142–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154



Введение

Подавляющее большинство работ, связанных с применением возбуждаемых волн Рэлея, направлены, как правило, на выявление дефектов, расположенных на свободной поверхности твердого тела или на границе сред [1–3], определение физико-механических свойств материалов по данным скорости поверхностной акустической волны (ПАВ), ее амплитудно-частотным, амплитудно-угловым зависимостям [4–6]. Превалирующая часть энергии этих волн локализована в поверхностном слое (слоях) исследуемого материала глубиной, не превышающей их длины волны ($h \approx \lambda_{\text{ПАВ}}$). Благодаря ряду особенностей распространения, эти волны, а также эффекты их трансформации используются в системах обработки информации [6].

Дальнейшее расширение возможностей применения ПАВ связано с решением ряда задач по их распространению при наличии неоднородных граничных условий на контактной поверхности. Такие условия создаются, например, при прохождении ПАВ по поверхности, имеющей сложный рельеф, включая выступы, радиусные переходы, проточки и др., а также при наличии в области распространения акустической нагрузки, создаваемой контактом с другим телом. При этом процессы трансформации и рассеяния поверхностных волн на таких объектах представляют значительный интерес для совершенствования неразрушающих методов контроля значительного числа объектов, а также для решения обратной задачи, заключающейся в использовании указанных эффектов для создания средств ультразвуковых измерений.

Наличие разных граничных условий в области контакта тел обуславливает превалирующий механизм трансформации и рассеяния упругих мод. В работе [8] получены обобщенные условия существования слабозатухающих ПАВ или волн Стоунли, трансформированных из волны Рэлея и обратно на акустической нагрузке при наличии не только скользящего, жесткого, но и комбинированного контакта. В экспериментальной работе [4] исследованы преимущественно особенности трансформации волны Рэлея в волну Стоунли и обратно на акустической нагрузке, создаваемой путем контакта с твердым телом через скользящую границу, определены функции прохождения и отражения потока энергии ПАВ от передней и задней границ контактирующих

тел в зависимости от угла наклона одной из граней нагружающего тела призматической формы диапазоне $-\pi/4 \leq \gamma \leq \pi/4$. Если же граничные условия вырождаются в «жесткие», то, как показано на одном из примеров, параметры трансформации и рассеяния мод имеют существенные отличия. В этом случае превалирующая часть энергии ПАВ на выступе трансформируется в объемную поперечную моду. В этом случае отражательная способность области контакта одинаковых по свойствам тел при реализации их жесткой границы $R = P_2/P_1$ более чем на порядок меньше, чем при наличии скользящей границы, где P_1 и P_2 – амплитуды отраженных волн от передней и задней границ контакта тела акустической нагрузки с основой. В то же время коэффициенты прохождения акустического сигнала через выступ (с учетом двойной трансформации мод) сравнимы по величине.

В работе [9] при исследовании прохождения подповерхностной поперечной волны в зависимости от длины выступа высказано предположение о существенном вкладе в результирующее поле рассеянной краевой поперечной волны при трансформации ПАВ в зоне сопряжения передней грани выступа с контактной поверхностью.

Необходимо отметить, что при постановке задачи о прохождении ПАВ через линейную границу контакта тел Γ , разделяющую области с различными граничными условиями относительно составляющих тензора напряжений $\{(\sigma_{ik})_I, (\sigma_{ik})_{II}\}$ и тензора смещений $\{(\xi_i)_I, (\xi_i)_{II}\}$, последние изменяются скачкообразно. При этом в окрестности границ $\Gamma(x_{0i})$ контакта поверхности тела нагрузки с контактной поверхностью при $\Delta x_i = x_i - x_{0i} \rightarrow 0$ $\Delta(\xi_i)_{I,II}/\Delta x_{0i} \rightarrow \infty$. Передаточная же функция, характеризующая трансформацию мод или изменение основной моды в процессе прохождения этой границы, проявляет сингулярность при $\Delta x_i \rightarrow 0$. Важно отметить, что теоретическое моделирование подобных процессов (трансформации) при сочетании других типов мод выполнено, например, на исследуемом объекте с трещиной [2, 7]. Что касается теоретического моделирования процессов трансформации и рассеяния ПАВ на объектах с выступами разной геометрии, то они недостаточно изучены. В этом случае для корректного выбора той или иной модели требуется проведение экспериментальных исследований и тщательный анализ их результатов. Очевидно, что указанные процессы представляют не только научный, но и практический интерес.



Цель данной работы заключалась в уточнении механизма трансформации волны Рэлея и закономерностей формирования полей рассеянных объемных мод на объектах с выступами разной геометрии и выявлении возможностей использования результатов исследований в области ультразвукового контроля и измерений.

Краткий теоретический анализ проблемы для случая двумерной постановки задачи

При падении акустического пучка на плоскую контактную поверхность объекта под характерным углом $\beta = \arcsin(c_1/c_s)$, в объекте возбуждается не только основная поверхностная мода (волна Рэлея), но и сопутствующие объемные моды – продольная (L) и поперечная (T) мода, обозначаемые дополнительным индексом A , c_1 – скорость звука в среде, из которой падает волна, а c_s – скорость ПАВ. Так что энергия падающего потока акустического пучка равна:

$$w_0 = w_s + w_{TA} + w_{LA},$$

где преобладающей является энергия возбуждаемой рэлеевской волны.

Энергия ПАВ по мере прохождения в области сопряжения контактной поверхности объекта (ОСП) с передней гранью выступа в процессе трансформации мод перераспределяется между энергией краевых мод (поперечной и продольной) за вычетом энергии отраженной и прошедшей ПАВ. Таким образом, в общем случае результирующее поле поперечных (P_T) и продольных (P_L) волн в объекте представляется в виде:

$$P_T = P_{TA} + P_{TE}, \quad P_L = P_{LA} + P_{LE}, \quad (1)$$

где индекс A относится к сопутствующей моде, E – к краевой моде.

В отсутствие расхождения ПАВ и диссипативных потерь коэффициент преобразования ее по энергии в краевые моды имеет вид:

$$(k_{s/E})_w = 1 - (D_s)_w - (R_s)_w \approx (\kappa_{TE})_w + (\kappa_{LE})_w, \quad (2)$$

где $(D_s)_w$ и $(R_s)_w$ – коэффициенты прохождения и отражения от ОСП выступа по энергии соответственно; $(\kappa_{TE})_w$ и $(\kappa_{LE})_w$ – коэффициенты преобразования по энергии ПАВ в краевую поперечную и продольную моды соответственно.

В частном случае, когда безразмерный радиус ОСП $R_\lambda = R/\lambda_R \gg 1$, где λ_R – длина ПАВ, то представляется возможным получить аналитическое выражение для функции распределенных

по указанной поверхности источников краевых волн, зависящей от положения на радиусном переходе ОСП, определяемом углом θ и радиусом R , где $(k_{s/E})_w = F(R, \theta)$. Элементарный участок радиусного перехода $ds = c_s dt = R d\theta$, проходимый ПАВ за промежуток времени $dt = ds/c_s \ll v^{-1}$, может быть рассмотрен как элементарный источник краевых объемных волн, где v – частота волны. Используя известное выражение для коэффициента ослабления поверхностной волны δ и предположение о радиальном направлении излучения краевых мод [6], получим функцию источников поперечной и продольной моды, плотности энергии которых Ξ_T и Ξ_L соответственно. С учетом принятых допущений и представляя $\delta_\lambda = \delta/\lambda_s$ (где δ_λ – ослабление волны Рэлея на участке пути длиной λ_s), дифференциальное уравнение баланса потоков энергии краевых мод в дифференциальной форме примет вид:

$$dw_s/dt = c_R R^{-1} dw_s/d\theta = -(c_T \Xi_T + c_L \Xi_L), \quad (3)$$

$$\text{где } w_s = \eta \rho^{-1} \frac{P_{s0}^2}{\tilde{n}_s} \exp(-2R\delta_\lambda \theta / \lambda_s) -$$

параметр, характеризующий энергию потока ПАВ в окрестности $s = R\theta$; P_s – амплитуда давления волны на поверхности ОСП; η – постоянная, зависящая от R_λ и свойств материала. Поскольку

$$\Xi_T \sim \rho^{-1} \frac{P_T^2}{c_T^2}, \quad \Xi_L \sim \rho^{-1} \frac{P_L^2}{c_L^2},$$

то, положив $\kappa^2 = \Xi_L/\Xi_T$, выражения для амплитуды излучаемой краевой поперечной и продольной моды примут вид:

$$P_T = 2p_{s0} \exp(R\delta_\lambda \theta / \lambda_s) (c_T \eta \delta_\lambda)^{0.5} [c_s \lambda_s (1 + \frac{\tilde{n}_T}{\tilde{n}_L})]^{-0.5} = P_L / \kappa. \quad (4)$$

Согласно полученным предварительно опытными данным, уже при $R_\lambda > 1-2$ отражением ПАВ от радиусного перехода выступа можно пренебречь. Используя выражения (2)–(4), можно получить выражение для $(\kappa_{TE})_w$, $(\kappa_{LE})_w$ и, соответственно, для $(\kappa_{s/E})_w$. Таким образом, для данного случая и с учетом сделанных выше предположений поле краевых мод в некоторой точке объема выступа M может быть представлено с точностью до множителя в виде:

$$P_{TL} \sim \left(\int_s F(\omega, t, \tau) \exp[i(\omega t - 2\pi R_\lambda \theta + iR\theta\delta_\lambda)] f_1(\vec{r}) f_2(\phi) ds, \quad (5)$$

где $F(\omega, t, \tau)$ – функция, описывающая форму импульса длительностью τ с угловой частотой $\omega = 2\pi v$, причем для $\omega \rightarrow \infty$ $F \rightarrow 1$; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения M



из координаты элементарного источника излучения краевой волны на радиусном переходе; $f_1(\bar{r})$ и $f_2(\phi)$ – функции, характеризующие ослабление амплитуды волны с расстоянием и направленность элементарного источника излучения ds .

Таким образом, используя выражения (4) и (5), на основе предложенной модели можно рассчитать результирующее поле в объеме выступа в двумерном приближении, пренебрегая диссипативными процессами и учтя вклад поля сопутствующей моды P_{TA} . Необходимо отметить, что если $R_\lambda \approx 1$ и меньше, то следует ожидать проявление более сложного механизма трансформации мод ($L_E \leftarrow \text{ПАВ} \rightarrow T_E$) и изменения структуры формируемого поля краевой поперечной и продольной моды.

Ниже на первом этапе исследований получим экспериментальные и расчетные данные о влиянии радиусного перехода на формируемое поле в объеме акустической нагрузки типа выступ, когда его угол $\gamma = \pi/2$. На втором же этапе исследуем влияние угла выступа γ на это поле. Третий этап посвящен рассмотрению возможностей использования результатов исследований на практике.

Методические особенности исследований

Экспериментальные схемы проводимых исследований поясняются на рисунках 1 и 2,

где объектом исследований служили стальные цилиндрические образцы радиусом 60 мм с вырезом в виде сектора, угол которого варьировался в диапазоне $\gamma = 35\text{--}180^\circ$. Причем в образцах с углом выступа $\gamma = 90^\circ$ и на его ОСП выполнены радиусные переходы разной величины, что позволяло варьировать безразмерную величину R_λ в диапазоне 0–10,2. Для изучения возможностей выявления дефектов, слабо отражающих звук, были изготовлены образцы с расположенными на разной высоте плоскодонными отражателями и разным радиусом ОСП. Рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) рэлеевских волн $\nu = 1\text{--}3$ МГц.

При исследовании поля трансформированных волн в объеме выступа наклонный ПЭП с магнитным прижимом устанавливался на контактную поверхность образца для излучения ПАВ в направлении ОСП. Источником и приемником недедетированных электрических импульсных сигналов служат электронные блоки генераторов УД2-12, осциллограф С1-71, измеритель временных интервалов И1-8, используемый для синхронизации и анализа параметров акустического сигнала. Изучались особенности трансформации ПАВ в объемные моды и формирования поля рассеяния краевых как поперечных, так и объемных волн.

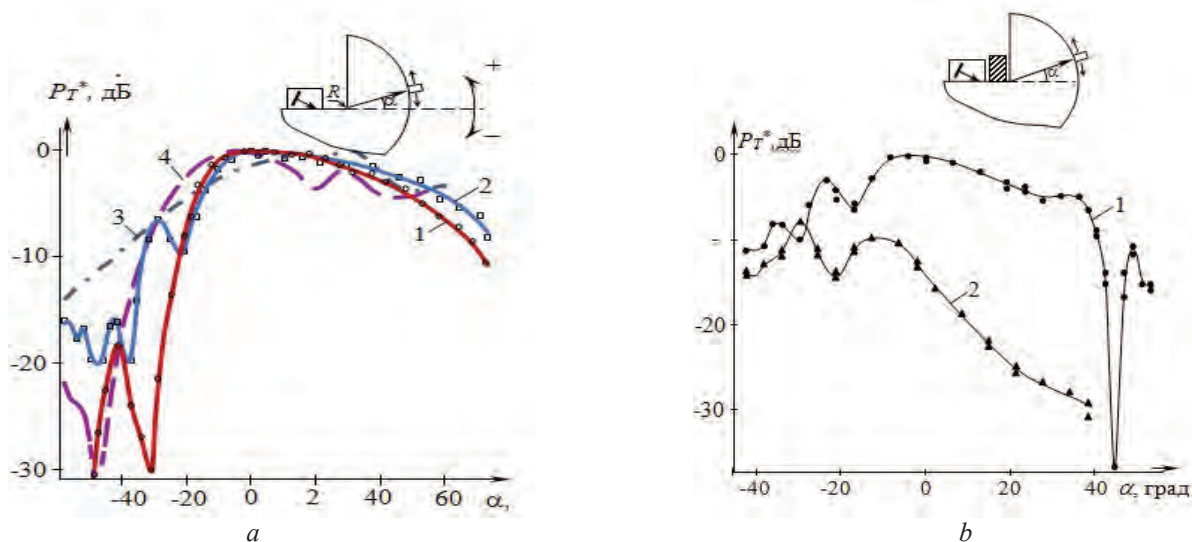


Рисунок 1 – Влияние радиусного перехода выступа (а) и акустической нагрузки на контактной поверхности образца (b) на акустическое поле в объеме образца с выступом. а: $R_\lambda = 7$; ν , МГц = 1(1), 1,8 (2–4); 1, 2 – эксперимент; 3 – расчет для случая одного источника, 4 – расчет для случая двух источников поперечной моды; b: акустическая нагрузка отсутствует (1) и есть (2), $R_\lambda = 0$, ν , МГц = 1,8

Figure 1 – Influence of radius transition of ledge (a) and acoustic loading on the pin surface of specimen (b) on the acoustic field in the volume of the specimen with the ledge. а: $R_\lambda = 7$; ν , MHz = 1(1), 1,8 (2–4); 1, 2 – is an experiment; 3 – is a calculation when an one source of transverse waves to appear, 4 – two sources to be; b: the acoustic loading is absent (1) but exist (2), $R_\lambda = 0$, ν , MHz = 1,8

Для измерения амплитуды поперечной моды служили ЭМА-преобразователи с шириной намотки провода приемника 1 мм, а продольной – контактный ПЭП с апертурой 1,5 мм, фиксируемый на образце с помощью магнитной системы. Последний выполнен с возможностью перемещения по круговой траектории. Для повышения достоверности измерение амплитуды производилось путем сравнения с опорным сигналом, подаваемым на осциллограф от генератора стандартных сигналов. Для сравнительного анализа теоретической модели формирования акустического поля в объекте амплитудно-угловая зависимость поля сопутствующей объемной моды (излучаемой одновременно с ПАВ) представлялась косинусоидальной кривой. Причем угол максимума и угловая ширина поля сопутствующей моды и его угловая полуширина определялись экспериментально. Для этих целей использован образец с идентичной контактной поверхностью в виде полуцилиндра.

При проведении расчетов нормализованной амплитудно-угловой функции поперечной волны в объеме выступа использованы формулы (4) и (5), а также учитывался конкретный размер образца, форма и длительность импульса. Огибающая импульса имеет форму колокола с количеством осцилляций в нем $n=5$. Направленность элементарного источника краевой моды размером ds на поверхности ОПС описывается функцией $f_2(\phi) \sim \cos(b\phi)$, где подгоночный коэффициент b взят равным 0,5. Источник (мнимый) поля сопутствующей моды расположен в плоскости, перпендикулярной акустической оси ее поля излучения и проходящей через точку с координатой $x = z = 0$. Параметры этого источника определялись на основе экспериментальной зависимости поля излучения в образце без выступа.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Поле поперечной волны в объеме выступа с углом $\gamma = 90^\circ$

Результаты экспериментальных исследований прохождения и трансформации ПАВ на объектах с различной геометрией акустической нагрузки в виде выступа приведены на рисунках 1, 2. Причем на рисунке 1а даны сравнительные данные расчета согласно предложенной теоретической модели и данных эксперимента при наличии радиусного перехода на образце

с $R_\lambda \approx 7,2$. На рисунке 2 приведены (для удобства) характерные зависимости полей рассеяния поперечной и продольной волны в полярных координатах для случая, когда $R_\lambda \ll 1$.

Как видно из представленных экспериментальных данных, все исследуемые зависимости нормализованного поля поперечной моды в образце с выступом $P_T^*(\alpha)$ имеют максимум и ассиметричны относительно плоскости $z = 0$. Варьирование радиуса ОСП и частоты волны (или R_λ), положения ПЭП в той или иной мере сопровождается пространственным перераспределением потока акустической энергии, большая часть которого сконцентрирована в области $\alpha > 0$. В то же время смещение угла максимума поля α_{\max} относительно нулевого значения не превышает $\pm(5-10)^\circ$, а изменение амплитуды поля в этом угловом диапазоне не более 2–3 дБ. Обращает на себя внимание поведение зависимости $P_T^*(\alpha)$ в области $\alpha < -(10-15)^\circ$, где при определенных условиях наблюдаются осцилляции поля с амплитудой, достигающей 5–6 дБ, и периодом $\approx 10-15^\circ$, что, как предполагается, является результатом взаимодействия сопутствующей T_A и рассеянной на ОСП выступа краевой T_E моды при прохождении ПАВ. Из результатов исследования вытекает, что наиболее значимым фактором, вызывающим изменение структуры поля в области $\alpha \approx 0$ и выше (что весьма важно для практики), является безразмерный радиус R_λ .

Следует обратить внимание на тот факт, что независимо от рабочей частоты преобразователя поле рассеяния $P_T(\alpha)$ имеет ярко выраженный минимум, достигающий при $R_1 \rightarrow 0$ десятков децибел в окрестности характерного значения угла приема поперечной волны $\alpha \rightarrow \alpha_{\min}$. Причем в исследованном частотном диапазоне изменение последнего не превышает 4–5° при погрешности угловых измерений не более 1°. С увеличением же R_λ величина этого минимума резко уменьшается, а угловая ширина амплитудно-угловой зависимости нормализованного поля $P_T^*(\alpha)$, взятая на уровне 6 дБ, возрастает. Так, если $R_\lambda \approx 7,2$ и $R_\lambda \rightarrow 0$, то это возрастание достигает ≈ 2 раз.

На рисунке 1а приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, выполненных согласно рассмотренной выше (упрощенной) полуэмпирической модели (формулы (1), (4), (5)), представляющей результирующее поле ПЭП как суперпозицию полей сопутствующей и краевой моды. При этом угловая зависимость в виде косинуса, характерная



для функции направленности малоапертурного источника поперечных волн типа длинной полосы, работающего в поршневом режиме и расположенного в окрестности координаты $x = z = 0$, занимает промежуточное положение между экспериментальными кривыми, полученными для $R_\lambda = 0$ и $R_\lambda = 7,2$.

Как установлено, предложенная расчетная модель формируемого поля поперечной моды в образце с углом выступа $\gamma = 90^\circ$ и достаточно большим радиусом ОСП качественно неплохо описывает данные эксперимента в важном для практики ультразвукового контроля угловом диапазоне $-10^\circ < \alpha < 40^\circ$. При этом расхождение опытных данных с расчетными не превышает 1–2 дБ и может быть уменьшено, если для описания поля использовать среднее арифметическое значение функций, рассчитанных с учетом сопутствующей моды и без нее. В то же время отличие расчетных и экспериментальных данных может достигать ≈ 5 –6 дБ в области углов $\alpha < -(10$ –15) $^\circ$, где проявляются интерференционные процессы, обусловленные взаимодействием краевой и сопутствующей моды.

Поле поперечной и продольной волн в объеме выступа с изменяющимся углом γ

Как экспериментально установлено, увеличение R_λ в диапазоне 0–3 практически приводит к нивелированию упомянутого обнаруженного локального минимума поля (минимума первого порядка), достигающего ≈ 20 –30 дБ и наблюдаемых осцилляций при $R_\lambda \rightarrow 0$ и $\gamma = 35$ –135 $^\circ$. Величина же угла $\alpha_{\min} = (\alpha_{\min})_1$ является квазилинейной функцией угла выступа в диапазоне $\gamma = 35$ –135 $^\circ$:

$$\alpha_{\min} = \Theta - \gamma, \quad (6)$$

где Θ – некоторый параметр, величина которого зависит от рабочей частоты волны. Причем для $\gamma \leq 90^\circ$ при варьировании частоты от 1 до 3 МГц величина Θ изменяется в диапазоне 132–137 $^\circ$ при погрешности угловых измерений не более 1 $^\circ$.

Для объяснения обнаруженного характера изменения параметров акустического поля при $R_\lambda \rightarrow 0$ были проведены дополнительные исследования по проверке высказанного предположения о появлении дополнительной поперечной моды, отходящей от поверхности передней грани выступа краевой в результате прохождения по ней краевой головной волны. Последняя же генери-

руется в результате трансформации ПАВ именно на выступе. (С точки зрения физики процесса, появление отходящей поперечной моды обусловлено необходимостью выполнения граничных условий на свободной границе, где тензор напряжений $\sigma_{ik} = 0$).

Для проверки этого предположения на переднюю грань выступа устанавливался приемный ПЭП с переменным углом падения волны β . Установлено, что независимо от γ максимум чувствительности измерений достигается при $\beta = \beta_1 = \arcsin(c_1/c_l) \approx 27^\circ$, что соответствует оптимальным условиям возбуждения (приема) головной волны. Т.е. при трансформации мод на ОСП выступа возбуждается мощный сигнал головной волны [10], трансформированной из ПАВ. Интересно, что в работе [11] подобный эффект был обнаружен для совершенно других условий – когда область возбуждения объемной волны имела вид тонкой полосы, расположенной на плоскости поверхности.

Варьируя в эксперименте угол выступа, было установлено, что максимум амплитуды ППВ достигается при $\gamma \rightarrow 90^\circ$. Учитывая, что ее распространение по передней грани выступа сопровождается отходящей поперечной волной, была предложена полуэмпирическая модель, описывающая результирующее поле, создаваемое тремя источниками:

$$P_T(\alpha) = P_{TE}(\alpha) + P_{TE}^*(\alpha) + P_{TA}(\alpha),$$

где $P_{TE}(\alpha)$ соответствует полю малоапертурного источника краевых волн, локализованного в окрестности ОСП, а $P_{TE}^*(\alpha)$ – полю отходящей от передней грани выступа поперечной моды, непосредственным источником которой (как нами обнаружено) служит краевая головная волна; $P_{TA}(\alpha)$ – поле сопутствующей моды.

Ввиду того, что эффективная апертура источника рассеянных в окрестности ОСП волн не превышает $a \approx \lambda_T$, а радиус цилиндрической поверхности приема волн $r \gg \lambda_T$, то безразмерная волновая зона $l \approx a^2(r\lambda_T)^{-1} \ll 1$. Таким образом, используя представления лучевой акустики и проведя элементарный анализ фазовых сдвигов волн в области их приема, сопоставляя амплитудно-угловые параметры приведенных выше источников, было получено обобщенное выражение для определения значений углов приема поперечной моды, соответствующих локальным экстремумам поля, включая угловой минимум



первого порядка $\alpha_{\min} = (\alpha_{\min})_1$.

Как показали опытные данные, выполненные с использованием образца без выступа, влиянием сопутствующей моды $P_{TA}(\alpha)$ в области $\alpha > 0$ можно пренебречь. Так что необходимым условием появления экстремума результирующего поля является наличие сдвига фаз в точке приема между T_E и T_{E^*} модами $\Delta\psi = m\pi$, где m – целое отрицательное число. При расчете значения α_{\min} (и значений углов других локальных экстремумов) используется формула (6), где:

$$\Theta = 180^\circ + \arctg(d/b) + \arcsin[(n(1 - \chi)(d^2 + b^2)^{-0.5}], \\ d = n + \sin\phi; b = \cos\phi; \phi = 33^\circ; n = c_L/c_T; \\ \chi = 0,5mc_T(rv\pi)^{-1}.$$

Как непосредственно следует из (6) и (7), $(\alpha_{\min})_1 \rightarrow 123^\circ - \gamma$, принимая минимальное значение при $\chi \ll 1$, что соответствует бесконечно большому волновому расстоянию, проходимо T_{E^*} модой до точки ее приема. И наоборот, с увеличением χ угол $(\alpha_{\min})_1$ возрастает, что согласуется с данными эксперимента.

Необходимо отметить, что наблюдается неплохое соответствие расчетных и экспериментальных данных (в пределах $\pm 1,5^\circ$), когда $m = -1$, т.е. полученных в предположении более позднего прихода T_{E^*} моды в точку приема с фазовым сдвигом π . Экстремумам же с номерами $m < -1$ (и при $\alpha > (\alpha_{\min})_1$) соответствуют быстро затухающие осцилляции кривой $P_T(\alpha)$, двойной размах амплитуды которых не превосходит 2–3 дБ. Если же угол выступа тупой ($\gamma = 135^\circ$), то, как показывают опытные данные, вклад отходящей T_{E^*} моды в результирующее поле ограничен окрестностью углов приема $\alpha \approx 0$. Это поле зависит преимущественно от пространственного распределения и силы его источников, локализованных в окрестности поверхности передней грани выступа, определяемых амплитудой и законом ослабления ППВ, длительностью импульса τ , частотой волны и геометрией объекта.

Необходимо отметить, что на основании хода зависимостей $P_T(\alpha)$ в окрестности локального минимума можно оценить вклад в результирующее поле отходящей T_{E^*} -моды. При этом учитывается тот факт, что при $\alpha \rightarrow (\alpha_{\min})_1$ в точке приема $P_T \approx P_{TE} - P_{TE^*} \xi$, где ξ – корректирующий коэффициент, учитывающий угол падения T_{E^*} -моды на цилиндрическую поверхность образца с установленным на ней приемным ЭМА-преобразователем. Величина же P_{TE}

получена путем интерполяции зависимости $P_T(\alpha)$ в окрестности угла $(\alpha_{\min})_1$.

Как установлено, наибольшее изменение максимума амплитуды результирующего поля под влиянием отходящей моды достигается при условии, когда $\gamma \rightarrow 90^\circ$. Так, например, для $v = 1,8$ МГц амплитуда T_{E^*} -моды в окрестности $(\alpha_{\min})_1$ всего на 8–10 дБ меньше амплитуды максимума исследуемой функции. При значениях γ , отличных от 90° , влияние этой моды на результирующее поле ослабевает.

Другая важная особенность формируемого результирующего поля поперечной моды в объекте заключается в том, что при $\gamma \leq 90^\circ$, $v = \text{const}$ и $0 \leq \alpha < \alpha_{\min} - \Delta\alpha$ нормализованная зависимость $P_{T^*}(\alpha)$ с погрешностью не более 1–2 дБ может быть аппроксимирована функцией:

$$P_{T^*}(\alpha) = 20\lg(P_T/P_T^{\max}) = 1 - \Lambda\alpha,$$

в которой $\Lambda \approx 0,15$ дБ/град, если $v = 1,8$ МГц.

Что касается структуры поля в области углов приема $\alpha < -10^\circ$, характеризующейся проявлением интерференционных процессов, то она достаточно чувствительна к положению ПЭП относительно выступа. Изменение последнего сопровождается фазовым сдвигом между сопутствующей ($P_{TA}(\alpha)$) и краевой ($P_{TE}(\alpha)$) модой, что и вызывает угловой сдвиг экстремумов результирующего поля и амплитуды волны.

Экспериментально установлено, что коэффициент прохождения волны Рэлея через ОСП выступа в зависимости от его угла $\gamma = 180 - 35^\circ$ уменьшается на ≈ 12 дБ, а коэффициент преобразования энергии ПАВ в краевые объемные моды возрастает на ≈ 90 %. При анализе амплитудно-угловых характеристик исследуемого поля необходимо учесть, что энергия краевых волн при варьировании угла выступа в диапазоне $35^\circ \leq \gamma \leq 135^\circ$ рассеивается по всему объему выступа. В результате этого максимум поля $P_T(\alpha)$ изменяется не более чем на 2–3 дБ, а его угловая ширина на уровне 6 дБ изменяется не более чем на 2–4° в образцах с $\gamma \leq 90^\circ$.

Отметим, что волновой фронт продольной моды в исследуемой области образца имеет структуру, существенно отличающуюся от той, что формируется поперечной модой. Отличительная особенность этих зависимостей заключается в наличии выраженного минимума, лежащего несколько ниже $\alpha = 0^\circ$, и двух максимумов, наибольший из которых расположен в области



$\alpha > 0^\circ$. Смещение глобального максимума в область $\alpha > 0$ с ростом γ достигает $40\text{--}50^\circ$, а различие между этими экстремумами составляет $\approx 6\text{--}10$ дБ. В то же время амплитуда поперечной моды в окрестности $\alpha \approx 0$, превосходит на порядок амплитуду продольной моды.

Прикладные аспекты

Повышение эффективности обнаружения слабо отражающих звук дефектов в объектах сложного профиля

Основные направления использования результатов исследования иллюстрируются на рисунках 3–5. Прежде всего, это касается вопросов контроля широкого спектра объектов с выступами, проточками, галтельными переходами, валиком усиления и др.

Необходимо отметить высокую эффективность использования изученных выше краевых поперечных мод для обнаружения слабо отражающих звук дефектов, расположенных в окрестности углов $\alpha \approx 0^\circ$ или выше, что в значительном числе случаев является актуальным при контроле объектов сложного профиля. При этом прозвучивание объекта поперечной модой производится в совмещенном или раздельно-совмещенном режиме с использованием традиционной схемы типа «дуэт» – путем разворота двух ПЭП по отношению друг к другу на угол 2π . Как показывают результаты исследований, при $R_\lambda \ll 1$ угол между плоскостями падения ПЭП следует выбирать не более $2\pi \approx 80\text{--}100^\circ$, чтобы не допустить значительных потерь энергии волны на отражение и создание шумового фона.

Пример выявления дефектов в образце с выступом одним ПЭП, работающим в режиме эхо, приведен на рисунке 3. Как видно, изменение частоты волны и расстояния до выступа приводит к изменению поля излучения-приема поперечной моды в окрестности углов $\alpha \rightarrow 0$, что и определяет эффективность выявления слабо отражающих звук дефектов. (Отражающая плоскость последних ориентирована вертикально, а их оси лежат в окрестности $z \rightarrow 0$ или выше.) Важно отметить, что изменение относительного радиуса кривизны ОСП в диапазоне $R_\lambda = 0\text{--}7,2$ позволяет обеспечить достаточно высокую чувствительность метода (до $20\text{--}25$ мм²) в стальных изделиях даже при расстоянии ПЭП от выступа,

составляющем в ряде случаев $\approx 0,1$ м и более. (Это обусловлено слабой расходимостью ПАВ в пространстве.)

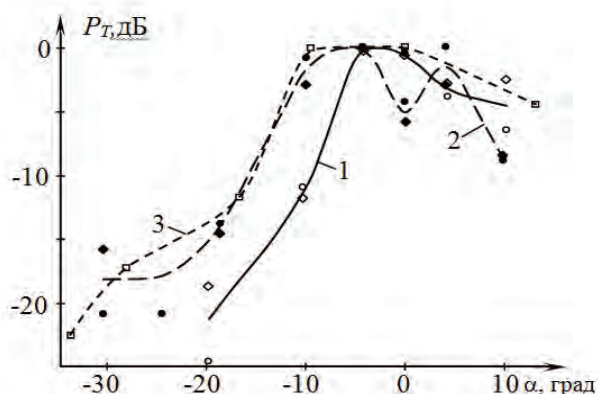


Рисунок 3 – Нормализованная амплитуда поперечной волны, отраженной от плоскодонного отражателя диаметром 4 мм, выполненного в объеме выступа, полученная с использованием пьезоэлектрического преобразователя волны Рэлея на частоте 1,8 МГц: $R, 10^{-3}$ м = 5 (1); 10 (2); 0 (3); расстояние до выступа $x, 10^{-3}$ м = 20 (○, ●, □); 48 (◇, ◆)

Figure 3 – Normalized amplitude of the reflected transverse wave from a flat-bottomed reflector by a diameter a 4 mm in the specimen volume with ledge, which was got with the use of of the Rayleigh wave probe when ultrasonic frequency is 1,8 MHz: $R, 10^{-3}$ m = 5 (1); 10 (2); 0 (3); distance to the ledge of $x, 10^{-3}$ m = 20 (○, ●, □); 48 (◇, ◆)

На рисунке 4 приведена схема предложенного метода трансформации волн для контроля основного металла фланцевого разъема конвертора в районе технологического выступа «шип-паз» с целью выявления возможного дефекта в области шип-паза (рисунок 4). Этот метод и реализующее его устройство были использованы при разработке методики контроля указанного объекта, внедренной на одном из предприятий нефтегазовой промышленности Республики Беларусь К.А. Филипповым.

Технологически потенциально опасным дефектом (в химическом производстве) является вертикально ориентированная плотно сжатая трещина, расположенная на расстоянии $\approx 0,1$ м, от места расположения источника-приемника зондирующих объект упругих волн. Апробирование известных методик, включая наиболее эффективную из них – с использованием головных волн [10], не позволили достигнуть необходимой чувствительности из-за существенного ослабления амплитуды волны вследствие дифракции. Применение впервые предложенного метода,



основанного на формировании поля краевых поперечных волн, трансформированных из ПАВ на радиусном переходе технологического выступа объекта, позволило в 4–5 раз повысить чувствительность контроля. При этом выбор рабочей частоты (1,8 МГц) определен из условия, обеспечивающего заданную диаграмму направленности поля излучения-приема устройства в вертикальной плоскости и амплитуду колебаний $P_T(\alpha)$. Использование разработанной методики контроля и устройства позволило избежать дорогостоящего демонтажа оборудования и остановки на длительный срок важного химико-технологического процесса.

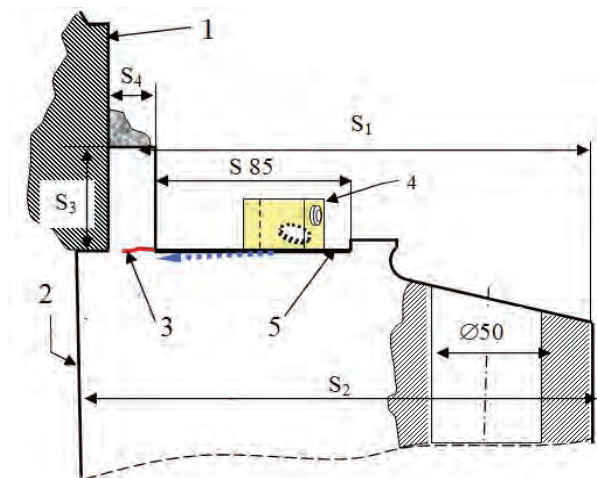


Рисунок 4 – Пример использования эффекта трансформации волн для контроля основного металла фланцевого разъема конвертора в районе технологического выступа «шип-паз»: 1 – конус трубной; 2 – фланец корпуса; 3 – горизонтально ориентированные трещины (отрыв); 4 – акустический блок; 5 – уплотнительная поверхность фланца: S_i , 10^{-3} м = 0,190 ($i = 1$); 0,226 ($i = 2$); 0,050 ($i = 3$); 0,020 ($i = 4$); 0,085 ($i = 5$)

Figure 4 – Example of the use of effect of transformation of waves for testing of basic metal of the flange's socket of converter in the district of technological ledge «thorn-slot»: 1 – is a cone pipe; 2 – is a flange of corps; 3 – are the horizontally oriented cracks (digging up); 4 – is an acoustic block; 5 – is a condensation surface of flange: S_i , 10^{-3} м = 0,19 ($i = 1$); 0,226 ($i = 2$); 0,05 ($i = 3$); 0,02 ($i = 4$); 0,085 ($i = 5$)

Дистанционный метод измерений акустических свойств материалов при воздействии внешних полей, температур и др.

В технике акустических измерений существуют задачи по структуроскопии материалов, определению их физико-механических свойств под воздействием мощных полей, энергетических потоков и др., что существенно ограничивает

возможности применения современных средств акустического контроля вследствие влияния указанных факторов на электронно-акустический тракт и надежность функционирования измерительной системы. Для преодоления этого препятствия может быть использован предложенный подход, заключающийся в расположении источника-приемника упругих волн на достаточно большом удалении (до десятка сантиметров и более) от образца, что поясняется рисунком 5а. Представлена предложенная упрощенная схема измерений, содержащая исследуемый образец и жестко соединенный с ним волновод, выполненный из материала с близким волновым сопротивлением и звукопоглотителем на его донной поверхности. Толщина волновода определяется длиной возбуждаемой волны и выбирается не менее $h = (2-3)\lambda_R$, а длина волновода может быть до $L \approx 0,1$ м и более.

Распространяющаяся по волноводу волна Рэлея трансформируется в области его контакта с образцом в краевые объемные моды. Если диагностика объекта производится сугубо поперечной модой (скорость c_T и амплитуда p_T), то отражающая поверхность исследуемого образца плоская. Последней придают цилиндрическую форму, если требуется анализировать акустические параметры как поперечной, так и продольной моды. В этом случае при трансформации ПАВ возбуждаются краевые поперечные и продольные моды, которые после отражения от оппозитной поверхности образца обратно трансформируются на ОСП в волну Рэлея и принимаются ПЭП с временной задержкой $t_s \approx 2R[(c_T)^{-1} - (c_L)^{-1}]$. Благодаря ей обеспечивается раздельный прием объемных мод и нивелирование шумового фона.

Скорость той или иной моды C_{TL} определяется из выражения $C_{TL} = 2R(\Delta t_{TL})^{-1}$, где $\Delta t_{TL} = t_{TL} - t_0 + \Delta t_{TL}$; t_0 – время прихода отраженной ПАВ от границы контакта волновода с образцом, а t_{TL} – отраженной объемной моды; Δt_{TL} – некоторая временная поправка. В ряде случаев абсолютная скорость объемных мод может быть определена с погрешностью до $\sim 0,1\%$, а чувствительность к воздействию на образец фактору – $\sim 0,01\%$. Достоинство такой методики состоит и в достаточной простоте реализации измерения на разных частотах, а также возможности прозвучивания образца поперечными волнами разной поляризации, что достигается выполнением волновода заданной геометрии.

Источники и приемники локализованных вертикально поляризованных волн

Как экспериментально установлено, эффективность преобразования энергии ПАВ в поперечную моду может составить $\sim 70\%$, а отраженной ПАВ – не более нескольких процентов. Возможности использования эффекта трансформации поверхностной волны в объемные и обратно в качестве локальных источников-приемников различным образом поляризованных поперечных волн поясняются на рисунках 5 *b, c*. Путем выполнения волновода (включая область трансформации мод в виде выступа заданной геометрии) представляется возможным реализовать ряд достаточно простых и надежных схем ультразвуковых измерений. В частности, это касается излучения-приема упругих мод на разных частотах, что легко достигается путем размещения на контактной поверхности волновода ПЭП разной частоты и работающих отдельно или с определенной временной задержкой Δt_i между соседними источниками. Управляя расположением источников ПАВ на волноводе, работающих на разных частотах друг относительно друга, представляется возможным легко формировать акустические сигналы с достаточно сложным спектром, что представляет интерес для целей ультразвуковой спектроскопии. Кроме того, особенность таких источников заключается в возможности ввода в объект поперечных колебаний высокой плотности по энергии и разной поляризации.

Заключение

Проведен теоретический анализ и экспериментальные исследования трансформации волны Рэлея в краевые поперечные вертикально поляризованные и продольные моды и рассеяния их в объеме стальных образцов выступа при изменении угла выступа в диапазоне $35\text{--}180^\circ$, безразмерного радиуса кривизны его радиусного перехода в диапазоне $0\text{--}10,2$, а также представлены рекомендации по использованию результатов работы для ультразвукового контроля и измерений.

Установлено, что результирующее в объеме выступа поле поперечной моды в общем случае является асимметричным и представляет суперпозицию полей краевых мод, включая преобладающее поле рассеянной непосредственно на радиусном переходе выступа моды и поле отходящей от передней грани выступа под углом 33° к ней моды, генерируемой краевой головной волной,

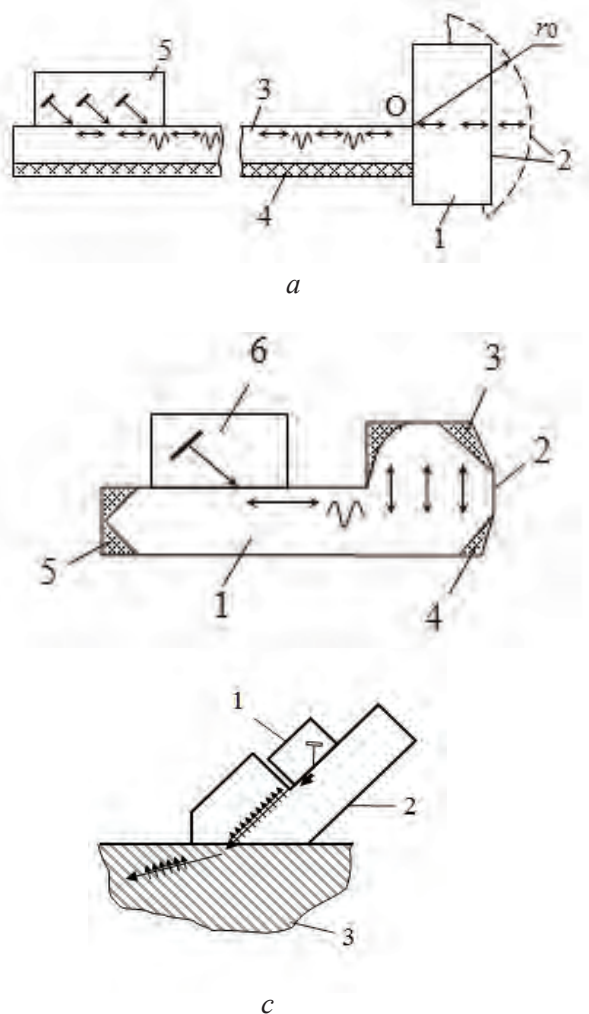


Рисунок 5 – Трансформация мод для ультразвуковых измерений: *a* – дистанционное измерение скорости и амплитуды сдвиговой и продольной моды; *b* и *c* – для возбуждения-приема сдвиговых волн. *a*: 1 – исследуемый объект с отражающей поверхностью 2; 3 – волновод ПАВ с поглотителем паразитных мод; 4 – поглотитель паразитных мод; 5 – источник ПАВ; *b*: 1 – волновод; 2 – рабочая поверхность устройства; 3–5 – поглотители паразитных мод; 6 – ПЭП; *c*: 1 – ПЭП; 2 – волновод-трансформатор мод; 3 – исследуемый объект

Figure 5 – Transformation of acoustical modes for the ultrasonic measuring of materials: *a* – to measure of speed and amplitude of transverse and longitudinal modes when ultrasonic probe is far from the specimen; *b* and *c* – for the excitation-reception of transverse waves. *a*: 1 – is the investigated object with a sound reflected surface 2; 3 – is a waveguide of surface waves with the absorber of parasite modes; 4 – absorber of the noise modes; 5 – is a source of wave; *b*: 1 – is a waveguide; 2 is a working surface of ultrasonic device; 3–5 – are the absorbers of parasite modes; 6 – ultrasonic device; *c*: 1 – ultrasonic probe; 2 – is a waveguide-transformer of modes; 3 – is the object to study

а также поля сопутствующей моды, излучаемой преобразователем одновременно с волной Рэлея.

Установлено, что структура поля краевой поперечной моды в образце с $\gamma = 90^\circ$ претерпевает изменение с увеличением безразмерного радиуса радиусного перехода выступа в диапазоне 0–10,2. При этом увеличивается угловая ширина поля, взятая на уровне 6 дБ, практически в 2 раза, а также смещается максимум поля в область больших значений углов приема волны. Обнаруженные же осцилляции поля с амплитудой до ≈ 5 –6 дБ в области углов приема $\alpha \approx - (10$ –15) $^\circ$ и менее вызваны преимущественно взаимодействием сопутствующей и краевой моды, рассеянной непосредственно в области радиусного перехода.

Предложена полуэмпирическая модель формирования поля краевых поперечных вертикально поляризованных волн в объеме прямоугольного выступа с безразмерным радиусом сопряжения контактной поверхности и передней грани выступа (≈ 6 –7 и более) в области углов приема моды от 40° до $- (10$ –15) $^\circ$ наблюдается неплохое соответствие (1–2 дБ) между данными эксперимента и расчета. В отсутствие радиусного перехода результирующее поле поперечных волн в объеме выступа имеет максимум в окрестности продолжения контактной поверхности образца, смещающийся на 5 – 7° при варьировании угла выступа в диапазоне 35 – 135° , а также ярко выраженный минимум первого порядка (20–30 дБ), угол приема которого убывает по линейному закону в этом диапазоне, что согласуется с расчетными данными в пределах 1 – $1,5^\circ$. Структура же поля краевой продольной моды имеет существенное отличие от поля поперечной моды, заключающееся в наличии двух ярко выраженных максимумов и минимума поля, лежащего в диапазоне углов от -10 до -20° .

Представлены результаты исследования влияния углового положения искусственных вертикально ориентированных плоскодонных отражателей в образце с выступом и различным радиусным на амплитуду эхо-сигнала поперечной моды, показавшие эффективность применения в качестве первичного источника зондирующего сигнала ПЭП волны Рэлея для контроля объектов с технологическими выступами.

Даны рекомендации и предложены направления использования результатов исследований включая следующие:

– выявление слабо отражающих звук дефектов;

– дистанционное измерение акустических свойств материалов на разных частотах, и находящихся под воздействием мощных внешних воздействий (электромагнитные поля, давление, температура и др);

– новый способ излучения и приема поперечных волн.

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. Pecorary, C. Scattering of a Rayleigh wave by a surface-breaking crack with faces in partial contact / C. Pecorary // Wave motion. – 2001. – Vol. 33. – P. 259–2701.

2. Базулин, Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом *c-saft*, с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 23–33. doi: 10.1134/S1061830911010037

3. Ушаков, В.М. Апробация ультразвукового метода измерения размеров усталостных трещин в сталях для оценки скорости их развития в процессе эксплуатации / В.М. Ушаков, Е.И. Мамаева // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 9. – С. 58–65.

4. Баев, А.Р. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница / А.Р. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 28–39. doi: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

5. Полупан, А.В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами / А.В. Полупан. – М. : Спектр, 2014. – 120 с.

6. Бирюков, С.В. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / С.В. Бирюков, Ю.В. Гуляев, В.В. Крылов, В.П. Плесский. – М. : Наука, 1991. – 415 с.

7. Данилов, В.Н. К расчету характеристик трансформации поперечных и продольных волн на отражателях с плоскими поверхностями / В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 31–39. doi: 10.1134/S1061830910090068

8. Аббакумов, К.Е. Влияние нарушения акустического контакта на распространение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств /



К.Е. Аббакумов, Р.С. Коновалов // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 52–58. doi: 10.1134/S10

9. Baev, A.R. Excitation and propagation of subsurface vertically polarized transverse waves / A.R. Baev, P.P. Prokhorenko, M.V. Asadchaya; Review of Quantitative Nondestructive Evaluation // Melville, New York, AIP Conf. Proc. / Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2005. – Vol. 24. – P. 91–96.

10. Разыграев, Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами – физические предпосылки и практическое применение / Н.П. Разыграев // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – С. 27–37.

11. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных преобразователей. 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.

Reference

1. Pecorary C. Scattering of a Rayleigh wave by a surface-breaking crack with faces in partial contact. *Wave motion*, 2001, vol. 33, pp. 259–2701.

2. Bazulin E.G. Determining the Flaw Type from Images Obtained by the C-SAFT Method with Account for Transformations of Wave Types upon Reflections of Ultrasonic Pulses from the Irregular Boundaries of a Test Object. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 30–44. doi: 10.1134/S1061830911010037

3. Ushakov V.M., Mamaeva E.I. [Testing of the ultrasonic method of measuring the size of fatigue cracks in steels to estimate the rate of development during the operation]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2012, no. 9, pp. 58–65 (in Russian).

4. 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

5. Polupan A.V. *Ul'trazvukovoj kontrol' poverkhnostnymi volnami* [Ultrasonic testing by surface waves]. Moscow, Spektr Publ., 2014, 120 p. (in Russian).

6. Birjukov S.V., Guljaev Ju.V., Krylov V.V., Plesski V.P. *Poverkhnostnye akusticheskie volny v neodnorodnykh sredakh* [Surface acoustic waves in inhomogeneous mediums]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 415 p. (in Russian).

7. Danilov V.N. On the Calculation of the Transformation Characteristics of Transverse and Longitudinal Waves at Reflectors with Flat Surfaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 46, no. 9, pp. 664–676. doi: 10.1134/S1061830910090068

8. Abbakumov K.E., Konovalov R.S. Influence of a Loss in the Acoustic Contact on the Propagation of Stoneley Waves near the Boundary between Solid Half-Spaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 196–201. doi: 10.1134/S10

9. Baev A.R., Prokhorenko P.P., Asadchaya M.V. Excitation and propagation of subsurface vertically polarized transverse waves. *Melville, New York, AIP Conf. Proc. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005, vol. 24, pp. 91–96.

10. Razygraev N.P. Ultrasonic Nondestructive Testing by Head Waves: Physical Prerequisites and Practical Use., 2004, vol. 40, no. 9, pp. 593–601.

11. Ljutkevich A.M., Zhukov 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'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

