

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ВЫСТУПОМ

Баев А.Р., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Выявлены особенности возбуждения, распространения и трансформации волны Рэлея в краевые волны на радиусном переходе прямоугольного выступа. Показана принципиальная возможность применения краевых объемных волн для контроля объектов с технологическими выступами и выявления не только поверхностных дефектов, но и дефектов со слабой отражающей способностью, расположенных в объеме выступа. Получены зависимости коэффициента преобразования волны Рэлея в краевые волны при прохождении поверхностной волны по радиусному переходу выступа. Установлено влияние сопутствующей поперечной волны, возбуждаемой совместно с волной Рэлея, на формируемое в объеме выступа результирующее поле. (E-mail: baev@iaph.bas-net.by)

Ключевые слова: волны Рэлея, краевые волны, радиусный переход, пьезопреобразователь, акустическое поле.

Введение

Объекты тепловой энергетики, химического машиностроения, авиастроения и других отраслей промышленности достаточно часто имеют различные технологические выступы, радиусные переходы сопрягаемых поверхностей и другие изменения профиля поверхности. Именно в этих местах возможно образование трещин, раковин и других типов дефектов, возникающих как в процессе изготовления, так и при эксплуатации объектов. При проведении контроля широкого спектра изделий предпочтительны ультразвуковые методы – благодаря их высокой чувствительности, простоте и надежности. Причем для контроля объектов со сложным рельефом поверхности весьма эффективно использование волн Рэлея (RW), способных распространяться в труднодоступных местах, включая внутренние поверхности каналов и технологических отверстий с минимальным радиусом порядка 5 мм, канавки или кромки изделий с характерным поперечным размером до нескольких десятых миллиметра. Как известно [1], наибольшая эффективность возбуждения (приема) RW достигается при падении волны на объект под углом $\beta_R = \arcsin(C_1/C_R)$, где C_1 и C_R – скорости соответственно продольной

волны в призме пьезоэлектрического преобразователя и RW в объекте. При этом глубина контролируемой зоны h практически не превышает длины волны RW λ_R , то есть соответствует глубине локализации акустической энергии волны в исследуемом объекте. Нами обращено внимание на расширение возможностей применения пьезоэлектрического преобразователя RW для ультразвукового контроля объектов, имеющих выступы (валы прессового оборудования, валики усиления сварного шва и другие), путем трансформации RW в краевые волны (EW) – весьма чувствительные к дефектам со слабой отражающей способностью. О трансформации RW в EW упоминается, например, в работах [1–3], а также в [4] при изучении формирования поля пьезоэлектрического преобразователя вертикально поляризованных подповерхностных поперечных волн в объектах с выступом. При этом была установлена важность учета поля EW , генерируемой RW на радиусном переходе и являющейся сопутствующей основной моде. В настоящей работе на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований выявлены особенности прохождения и трансформации мод $RW \rightarrow EW$ на радиусном переходе выступа различной кривизны $\varepsilon = 1/R_0$ и формирования поля EW в объеме выступа.

Теоретический анализ возбуждения краевой моды волной Рэлея, проходящей по радиусному переходу твердого тела с выступом

В наиболее общем случае (двумерная постановка задачи) в качестве источника EW может быть рассмотрен локальный объем объекта, заключенный в области $\{R_0 \geq z \geq -\lambda_R, x_0 + R_0 + \lambda_R \geq x \geq x_0\}$, где R_0 – радиус кривизны поверхности. По сути дела, это область, в которой происходит преобразование RW в объемные моды, и в ряде случаев она может быть рассмотрена в качестве вторичного источника с распределенными в пространстве фазовыми и амплитудными параметрами. Согласно теоретической модели Викторова [1], при $R_\lambda = R / \lambda_R \geq 5-10$ основные потери энергии RW на преобразование в EW происходят, преимущественно, при движении волны по радиусному переходу в слое, ограниченном радиусами R_0 и $R_0 + \lambda_R$; получено также аналитическое выражение для коэффициента ослабления волны γ , проходящей по радиусному переходу, на длине пути, равном λ_R , когда $R_\lambda \gg 1$. В рассматриваемом ниже случае локальную зону радиусного перехода $dl = C_R dt = R d\varphi$, проходящую RW за сколь угодно малый промежуток времени dt , можно рассматривать как элементарный источник объемных EW – поперечной и продольной. Необходимо отметить, что в известных работах, отсутствует достаточно полная информация о механизме преобразования $RW \rightarrow EW$ и о конфигурации формируемого поля. Прежде всего, используя данные по γ , получим функцию источника EW , «генерируемых» поверхностью радиусного перехода прямоугольного выступа, предполагая, что главная ось излучения локального источника EW на участке dl направлена по радиусу.

Обозначим через U_R плотность энергии RW , а через U_T и U_L – плотности энергии излучения поперечной и продольной мод EW соответственно. А также учтем, что $\{U_{ПAB}, U_T, U_L\} \sim 0,5 \rho v_i^2 = \frac{P_i^2}{2C_i c_i}$, где v_i, P_i – амплитуды коле-

бательной скорости частицы и давления в волне соответственно; C_i – скорости звука i -й моды; причем $i = 1$ соответствует индексу $R, i = 2$ – T (поперечные волны), $i = 3$ – L (продольные волны). Тогда при $h \ll R_0$ уравнение баланса потоков энергии акустических волн в

дифференциальной форме может быть представлено в виде:

$$C_R \frac{dW_R}{R_0 d\varphi} = - (C_T U_T + C_L U_L), \tag{2}$$

где $W_R = \int_{R_0+d}^{R_0} U_R dR$.

Если также учесть, что изменение амплитуды давления RW на участке поверхности dl равно $dP_R = -(\gamma/\lambda_R) P_R R_0 d\varphi$, то можно получить связь между амплитудой RW P_R и амплитудой поперечной P_T и продольной P_L мод EW , и при этом:

$$P_T = 2c \sqrt{(1+m^2)^{-0,5} \Gamma C_T C_R \int_{-dl}^0 H_R^2 dH_L}, \tag{3}$$

$$P_L = \chi P_T,$$

где $m = \frac{C_T}{C_L}$; C_T и C_L – скорости поперечной и

продольной мод EW соответственно; χ – некоторый постоянный искомый коэффициент.

Используя функцию источника (3) и сделанные выше предположения, поле EW в некоторой точке объема выступа \vec{r}_0 может быть представлено с точностью до множителя в виде:

$$\Phi_{T,L} \sim \left\{ P_{T,L} F(\omega, \Omega, \tau) \exp [i(\omega t - 2\pi R_\lambda \varphi + 2\pi \gamma i R_\varphi / \lambda)] \psi(\alpha_\varphi) f_1(\vec{r}) dS, \right. \tag{4}$$

где $F(\omega, t, \tau)$ – функция, описывающая временную форму импульса, где ω – угловая частота волны, а τ – длительность импульса, при $\tau \rightarrow \infty$ $F \rightarrow 1$; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения M из координаты положения элементарного источника EW на радиусном переходе; $f_1(\vec{r})$ – функция, характеризующая ослабление амплитуды волны с расстоянием от точки излучения до точки наблюдения; $f_2(\alpha)$ – функция направленности элементарного источника излучения в точке на поверхности радиусного перехода \vec{R}_0 , где $\alpha = \arcsin(\vec{R}_0 dl / R_0 dl)$.

Следует указать, что при проведении расчетов учитывалась форма и длительность импульса, которая в нашем случае описывается функцией $F \sim \delta \sin \Omega t$, представляющей собой огибающую импульсного излучения в локальной точке поверхности радиусного перехода \bar{R}_0 , близкую по форме к реальной и определенную во временном интервале $t_0 < t < t_0 + \pi / \Omega$ ($\delta = 1$), где $t_0 = R_0 \varphi / C_R + t_D$; t_D – время распространения RW по плоской поверхности от преобразователя до входа в радиусный переход. Если же $t_0 > t$ или $t > (t_0 + \pi / \Omega)$, то $\delta = 0$; параметр $\omega / 2\Omega = n$, соответствующий количеству осцилляций в реальном импульсе, при расчетах взят равным $n = 5$ в согласии с условиями эксперимента.

Необходимо также отметить, что вследствие того, что элементарный источник EW находится на криволинейной поверхности, очевидно, что использование классического выражения для $f_2(\alpha) \sim \cos \alpha$ недостаточно корректно, поскольку в направлениях $\alpha = \pm \pi / 2$ $f_2(\alpha) \neq 0$. Поэтому ниже для упрощения расчетной модели нами использу-

ется функция $f_2(\alpha) \sim \cos \kappa \alpha$, где подгоночный коэффициент $\kappa < 1$.

Таким образом, для указанных модельных условий область радиусного перехода может рассматриваться как источник излучения продольной и поперечной мод с распределенной по поверхности радиусного перехода фазой и амплитудой. Если $R_\lambda \rightarrow \infty$, то в отсутствие диссипации энергии и расхождения волны амплитуда RW на выходе из радиусного перехода $P_R \rightarrow P_{R0}$. Отметим, что с увеличением R_λ расширяется область, занятая источниками EW , что должно сопровождаться уменьшением коэффициента затухания RW и, следовательно, коэффициента преобразования энергии RW в EW . При этом увеличивается разность между фазами волны на входе и выходе из радиусного перехода, что должно сопровождаться перераспределением энергии в объеме выступа. Результаты сравнения расчетов согласно рассмотренной выше модели с представленными ниже данными экспериментального исследования приведены на рисунке 1.

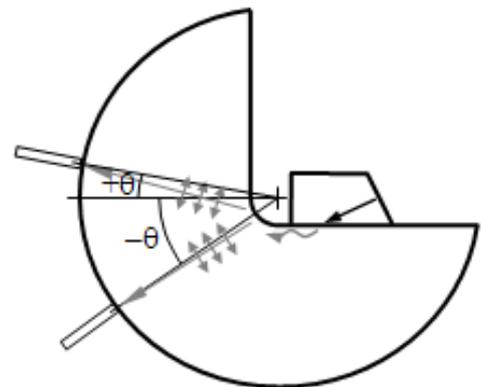
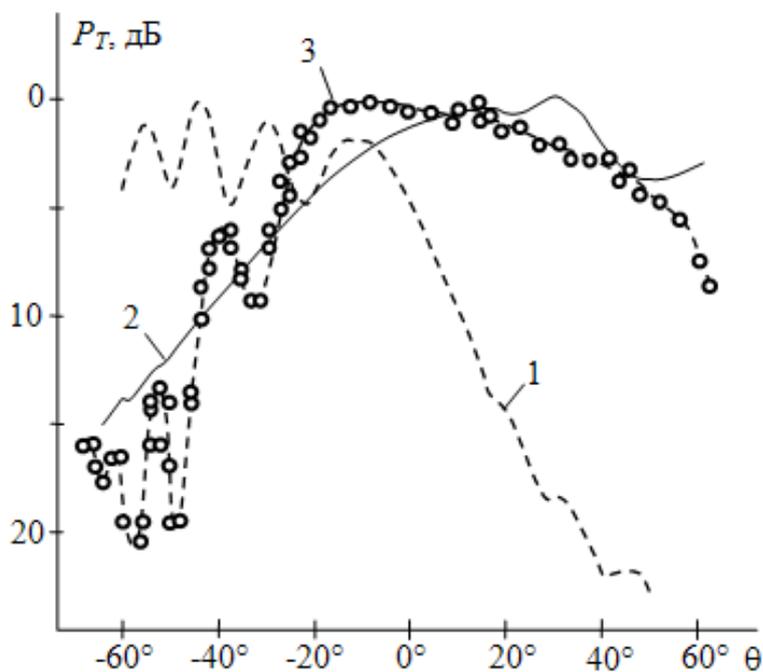


Рисунок 1 – Поле краевой поперечной моды, возбуждаемой волной Рэлея в образце с выступом и радиусным переходом: 1 и 2 – расчет; 3 – эксперимент; рабочая частота $f = 1,8$ МГц

Необходимо отметить, что в весьма важном для практики случае – $R_\lambda \leq 5$ – механизм возбуждения EW по мере уменьшения R_λ будет отличаться от рассмотренного выше и требуется экспериментальный подход для изучения особенностей формирования поля EW $\Phi(\theta)$ в этих условиях. Отметим, что для реализации метода измерений с использованием RW необходимы также данные о коэффициенте прохождения и отражения от радиусного перехода. Кроме того, даже при возбуждении RW преобразователем с оптимальным углом призмы β_R возможно появление дополнительных мод, которые могут оказать влияние на результирующее поле в объеме выступа. Указанные вопросы и являются предметом проводимых экспериментальных исследований.

Методика измерений

Используемые экспериментальные схемы исследований поясняются на рисунках 1–5 и предназначены для исследования формирования акустического поля EW в объеме выступа (рисунок 1); оценки отношения амплитуды RW к амплитуде поперечной сопутствующей моды излучающего пьезоэлектрического преобразователя $P_{RT} = P_R / P_{TA}$ (рисунок 2); определения амплитудных параметров RW , проходящей через радиусный переход, и трансформированной из нее на выступе поперечной моды EW P_T в зависимости от радиуса R_0 (рисунок 3); изучения отражения RW от свободной границы и от радиусного перехода выступа в зависимости от угла падения (рисунок 4). Схемы на рисунках 5а и 5б поясняют методику измерения поля RW в объеме выступа и амплитуды сигнала, отраженного от плоскодонных дефектов.

Аппаратура и электронная схема измерений подробно изложены в работе [4]. Используемые в эксперименте образцы изготовлены из стали, а в качестве излучателей используются преимущественно наклонные пьезоэлектрические преобразователи с углом призмы $\beta_R = 64^\circ$ и диаметром пьезоэлемента $2a = 12$ мм, рабочие частоты $f = 1; 1,8; 4$ МГц. Один из пьезоэлектрических преобразователей выполнен с изменяющимся углом падения ультразвуковых колебаний на объект. Тангенциальные поверхности колебания принимаются электромагнитно-акустическим преобразователем, имеющим ширину намотки провода 1 мм,

с установленным над ней самарий-кобальтовым магнитом. Сигнал с электромагнитно-акустического преобразователя усиливается усилителем УЗ-33, усилителем дефектоскопа и затем (недетектированный) подается на осциллограф С1-71. Нормальные поверхности объекта колебания принимаются прямым пьезоэлектрическим преобразователем с поперечным размером пьезоэлемента 1,5 мм и магнитным прижимом. При исследовании отношения $P_{RT} = P_R / P_T$ амплитуды RW P_R к амплитуде поперечной моды P_T в качестве излучателя используется пьезоэлектрический преобразователь с переменным углом ввода и постоянной точкой выхода акустического луча. Данные исследования прохождения RW через радиусный переход получены с использованием в качестве приемника сигнала на входе (P_I) и выходе (P_{II}) малоапертурных пьезоэлектрических преобразователей, причем коэффициент прохождения RW через радиусный переход определяется как $K_R = 20 \log (P_{II,\infty} / P_{II})$, где P_{II} – амплитуда RW на выходе из радиусного перехода, а $P_{II,\infty}$ – амплитуда RW для $R_\lambda = \infty$, измеренная на расстоянии, соответствующем длине пути по радиусному переходу.

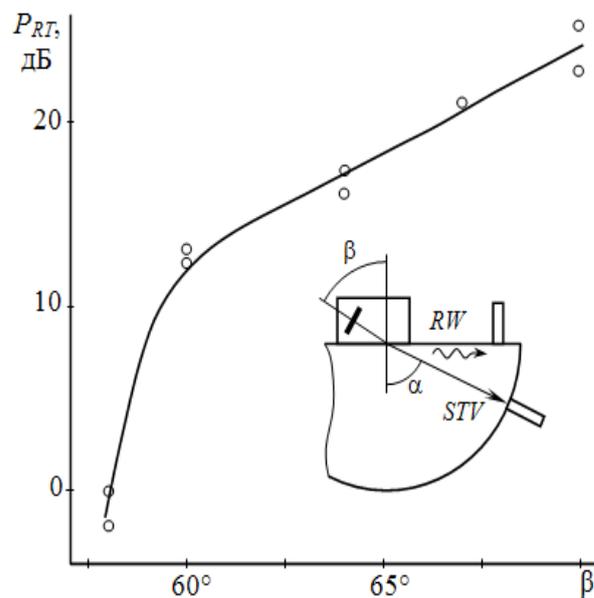


Рисунок 2 – Отношение амплитуд волны Рэлея и поперечной волны в зависимости от угла наклона призмы преобразователя; рабочая частота 1 МГц

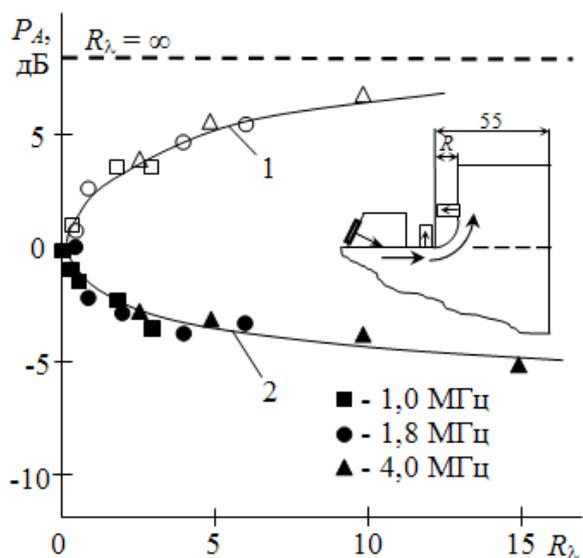


Рисунок 3 – Амплитуда волны Рэлея, прошедшей через радиусный переход (1), и амплитуда краевой волны, генерируемой волной Рэлея на радиусном переходе (2), в зависимости от радиуса перехода R_λ

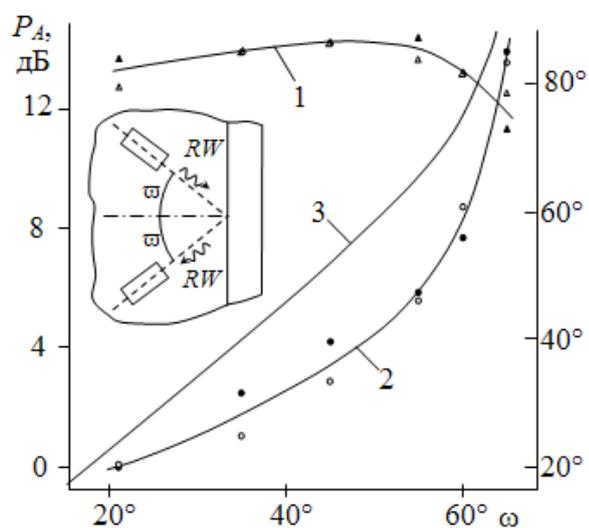


Рисунок 4 – Амплитуда волны Рэлея, отраженной от свободной поверхности (1) и прямоугольного выступа (2), и угол преломления поперечной волны в объеме выступа (3) в зависимости от угла падения

При измерениях амплитуды RW, отраженной от радиусного перехода выступа, излучение и прием сигнала осуществляются двумя наклонными пьезоэлектрическими преобразователями с углами призмы $\beta = \beta_R$. Исследования форми-

рования поля пьезоэлектрического преобразователя с $\beta = \beta_R$ в объеме выступа (рисунок 5а) и зависимости амплитуды сигнала EW , отраженной от вертикальных плоскостных дефектов диаметром 5 мм (рисунок 5б), проведены на рабочей частоте 1 МГц при различных положениях пьезоэлектрического преобразователя относительно выступа.

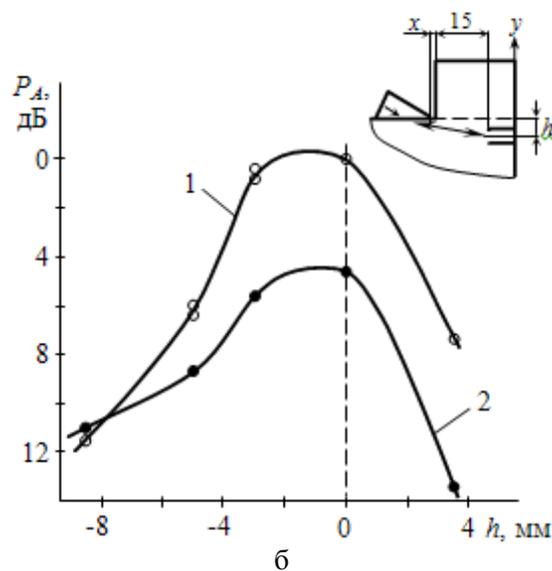
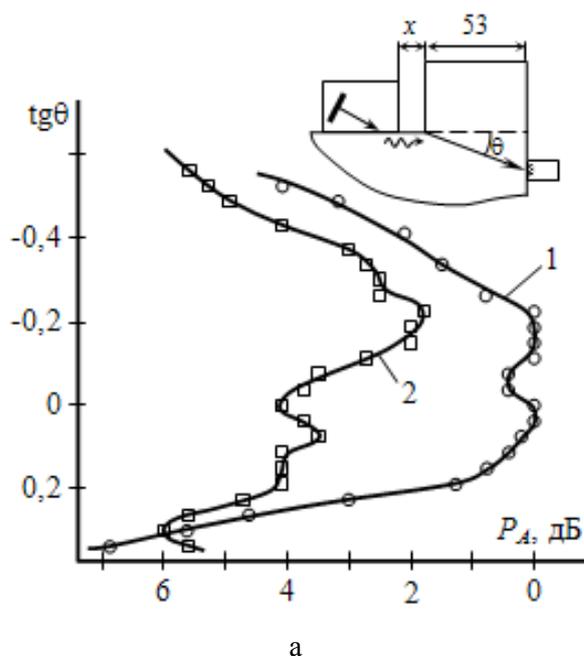


Рисунок 5 – Поле преобразователя волн Рэлея в объеме выступа (а) и амплитуда сигнала, отраженного от плоскостного дефекта (б), в зависимости от высоты его расположения при разной акустической базе x : а – x , мм = 4 (1); 28 (2); б – x , мм = 0 (1); 30 (2); $f = 1$ МГц

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Характерные результаты настоящих исследований представлены на рисунках 1–5. Причем на рисунке 1 приведено сравнение расчетных данных предложенной (упрощенной) теоретической модели формирования акустического поля EW в объеме выступа (формула 3) с данными эксперимента. На рисунке 2 представлены данные по оценке вклада поперечной сопутствующей моды излучающего пьезоэлектрического преобразователя, влияющей на формируемое в объеме выступа поле поперечных EW , а на рисунках 3 и 4 приведены параметры, характеризующие прохождение и отражение RW на радиусном переходе выступов. Рисунок 5 иллюстрирует возможности применения RW для выявления вертикально ориентированных дефектов, обладающих, как правило, слабой отражающей способностью.

Как видно из рисунка 1, наблюдается качественное соответствие между данными расчета амплитуды согласно предложенной модели, полученными для случая импульсного режима излучения [$\kappa = 0,5$ в формуле (4)], и данными эксперимента в важном для практики угловом диапазоне поля излучения $\Phi(\theta)$ поперечных EW $-20^\circ < \theta < 35-40^\circ$. При этом расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет $\sim 2-3$ дБ. Отметим, что независимо от рабочей частоты преобразователя ($f = 1-3$ МГц) и кривизны радиусного перехода ($R_\lambda \geq 0$) максимум поля $\Phi(\theta)$ лежит в окрестности плоскости контактной поверхности образца, а большая часть акустической энергии EW сосредоточена в верхнем объеме выступа ($z > 0$). Что касается поля EW в области углов $\theta < -20^\circ$, то, как видно, левая ветвь экспериментальной зависимости $\Phi(\theta)$ имеет ярко выраженные осцилляции с размахом 5–6 дБ и периодом $\sim 11-12^\circ$, что не согласуется с данными расчетов согласно предложенной модели. (Если же режим излучения непрерывный (кривая 1), то расчетная зависимость $\Phi(\theta)$ имеет осциллирующий характер во всей исследуемой области углов и существенные расхождения с данными эксперимента.)

На основании полученных данных сделан вывод о том, что существенное влияние на осциллирующий ход левой ветви $\Phi(\theta)$ оказывает дополнительный когерентный источник поперечных волн, которые являются сопутствующими

при возбуждении RW . Предполагается, что в объеме выступа $z \geq 0$ преобладающее влияние на формируемое поле оказывают именно EW , а при $z < 0$ необходимо учитывать поле, создаваемое сопутствующей модой.

Представленные на рисунках 2 и 3 данные исследований позволяют оценить амплитуду сопутствующей моды P_{TA} . Как видно на рисунке 2, отношение амплитуд возбуждаемых RW и сопутствующей поперечной моды P_{RT} представляет преимущественно возрастающую функцию угла падения волны β . Причем при $\beta \approx \beta_2 = \arcsin(C_1/C_T)$, где C_T – скорость поперечной волны в объекте, отношение $P_{TA} \sim 1$, т. е. P_{TA} в области максимума диаграммы направленности ($\alpha = 75-76$) сравнима по амплитуде с RW . (Амплитуда же сопутствующей поперечной моды, измеренная на поверхности образца при $\alpha \rightarrow 90^\circ$, на порядок меньше P_R). При $\beta > \beta_R$ заметно преобладает RW , превышающая амплитуду объемной моды на 14–18 дБ в частотном диапазоне 1–3 МГц. При прохождении RW через область радиусного перехода прямоугольного выступа максимальное уменьшение ее амплитуды в диапазоне $R_\lambda = 0 - \infty$ составляет 5–6 дБ (рисунок 3). Таким образом, роль сопутствующей поперечной моды в формировании результирующего поля в объеме выступа повышается и согласно численным оценкам в области характерных углов приема $\theta < \theta^*$ амплитуды интерферирующих волн разных источников могут быть сравнимы по величине. Что касается отражения RW от радиусного перехода, согласно данным эксперимента (рисунок 4) и данным Викторова [1], максимальный коэффициент отражения рэлеевской волны \mathfrak{R} для углов ее падения, близких к нормальному ($2\varpi < 10-20^\circ$), достигается при $R_\lambda \sim 0$ и составляет величину $\mathfrak{R} \leq 0,1$, что можно не учитывать при анализе $\Phi(\theta)$, когда $\theta \rightarrow 0$. Однако, \mathfrak{R} возрастает с увеличением ϖ , что должно сопровождаться более значимым влиянием сопутствующей поперечной моды на формируемое в объеме выступа поле. (Этот фактор необходимо учесть, если, например, используется схема измерений «дуэт» [3]).

Таким образом, наличие указанных факторов свидетельствуют о необходимости учета влияния сопутствующей поперечной моды на формируемое в объеме выступа поле ($z < 0$), которое может быть представлено как суперпозиция двух полей – поперечной EW Φ_{EW} и поперечной сопутствующей Φ_{TA} :

$$\Phi(\theta) = \Phi_{EW} + \Phi_{TA}.$$

При формировании поля в объеме выступа необходимо учесть различие скоростей распространения RW и поперечной волны ($\sim 9\text{--}10\%$), а также различие законов ослабления с расстоянием. При изменении положения пьезоэлектрического преобразователя относительно выступа изменяется фазовый сдвиг между упомянутыми источниками, а также амплитудные параметры возбуждаемых волн. Это подтверждается данными, приведенными на рисунке 5, свидетельствующими о заметном изменении структуры поля при изменении положения пьезоэлектрического преобразователя. Естественно, что это сказывается и на параметрах чувствительности метода и выявляемости дефектов, что иллюстрируется ходом зависимости амплитуды сигнала, отраженного от плоскодонных вертикально ориентированных искусственных дефектов при расположении пьезоэлектрического преобразователя на разном расстоянии от выступа. (Как известно [3], именно такие дефекты обладают низкой отражающей способностью и являются наиболее опасными.) На основе полученных данных исследования можно сделать вывод о возможности использования пьезоэлектрических преобразователей RW , работающих в совмещенном режиме, для выявления различных несплошностей, расположенных не только в окрестности радиусного перехода выступа, но и в объеме выступа, включая окрестность плоскости продолжения контактной поверхности объекта $z = 0$. В отличие от известных методик, использующих пьезоэлектрический преобразователь подповерхностных волн [3], применение RW -преобразователей позволяет проводить контроль на цилиндрических поверхностях разной кривизны.

Необходимо отметить, что, как показывают экспериментальные исследования, при возбуждении поперечной моды EW одновременно возбуждается и продольная мода, амплитуда которой более чем на порядок меньше поперечной моды. Это позволяет в большинстве случаев пренебречь ее вкладом в энергетический баланс и положить в уравнении (3) постоянную $\chi = 0$. Для рассмотренной геометрии выступа коэффициент преобразования энергии RW в EW максимален и достигает $65\text{--}70\%$ при $R_\lambda = 0$. Однако не только поперечная, но и продольная мода EW легко регистрируется при низком уровне шумо-

вого фона. Это дает возможность проводить измерения свойств твердых тел, находящихся под воздействием температур, напряжений и внешних полей, по данным разности скорости двух мод, используя образцы с выступом.

Заключение

1. Изучен акустический тракт применительно к возбуждению, распространению и рассеянию RW на радиусном переходе прямоугольного выступа и выявлены особенности формирования акустического поля $\Phi(\theta)$ вертикально поляризованной поперечной моды EW , трансформированной из RW и превалирующей на порядок по амплитуде над одновременно возбуждаемой продольной модой EW .

2. Получены данные по коэффициенту прохождения RW на радиусном переходе и преобразования в EW и предложена полуэмпирическая модель для описания поля EW $\Phi(\theta)$ в объеме прямоугольного выступа, дающая численное расхождение с экспериментальными данными $\sim 2\text{--}3$ дБ в важном для практики угловом диапазоне: $20^\circ < \theta < 35\text{--}40^\circ$. Показано, что осциллирующий ход левой ветви $\Phi(\theta)$ обусловлен суперпозицией акустического поля поперечной моды EW и сопутствующей поперечной подповерхностной моды, возбуждаемой одновременно с RW .

3. В связи с высокой эффективностью преобразования RW в EW на радиусном переходе (до $65\text{--}70\%$) и низким уровнем шумового фона, создаваемого отраженными модами, показана принципиальная возможность применения пьезоэлектрического преобразователя RW для выявления не только поверхностных дефектов, но и дефектов со слабой отражающей способностью, расположенных в объеме технологического выступа; определения свойств материалов, находящихся под воздействием температур, напряжений и внешних полей, по данным скорости продольной и поперечной мод краевой волны.

Список использованных источников

1. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
2. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / С.В. Бирюков [и др.]. – М.: Наука, 1991. – 415 с.

3. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге ; под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 832 с.
4. *Баев, А.Р.* Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах / А.Р. Баев, М.В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 19–43.

Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Kononov G.E.

Propagation of rayleigh wave in solids with fillet transitions

New distinctive features of the elastic wave excitation and propagation when the Rayleigh wave probes used have been discussed. It was principally shown that such probes can be used not only to find surface defects but to find vertically oriented defects of the low reflection ability. Experimental dependences of the coefficient transformation of Rayleigh wave into edge waves vs. radius of the fillet transition have been got. Influence of the «accompanying» transverse mode excited simultaneously with Rayleigh wave on the resulting acoustic field formation in the projection volume have been investigated. (E-mail: baev@iaph.bas-net.by)

Key Words: rayleigh waves, edge waves, fillet transition, piezoelectric probe, acoustic field.

Поступила в редакцию 17.10.2011.