ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 620.179-534.1

А. Р. Баев, д-р техн. наук, проф., М. В. Асадчая, канд. техн. наук, О. С. Сергеева

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С РАДИУСНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Рассмотрены особенности возбуждения и распространения упругих мод при использовании преобразователей волны Рэлея с углом призмы β_R. Приведены примеры использования таких преобразователей для определения 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. Выявлено влияние «сопутствующей» поперечной волны, возбуждаемой совместно с основной модой, на формируемое в объеме выступа результирующее поле.

Объекты тепловой энергетики, химического машиностроения, авиастроения и других отраслей промышленности достаточно часто имеют различные технологические выступы, радиусные переходы (РП) 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, 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) волн Рэлея достигается при падении волны на объект под углом $\beta_R = \arcsin(C_1/C_R)$, где C_1 и C_R – скорости продольной волны в призме пьезопреобразователя (ПЭП) и волны Рэлея (RW) в объекте соответственно. При этом глубина контролируемой зоны δ практически не превышает длины волны Рэлея λ_R, т. е. соответствует глубине локализации акустической энергии волны в исследуемом объекте.

Авторами рассматривается расширение возможностей применения ПЭП с углом призмы β_R для контроля объектов с различными РП путем трансформации RW в краевую моду. Этот вопрос частично затрагивался при исследовании формирования поля ПЭП подповерхностных поперечных вертикально поляризованных волн (STV) в объектах с выступом [2]. При этом была установлена важность учета и поля краевой волны (edge wave или EW), генерируемой на РП поверхностной волной, возбуждаемой одновременно с основной подповерхностной поперечной модой (STV), которая дифрагирует на выступе. Ниже приводятся теоретический анализ и результаты экспериментальных исследований особенностей возбуждения и формирования акустического поля в объеме выступа.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Анализ генерации краевой моды при прохождении RW по радиусному переходу

В наиболее общем случае (при двумерном рассмотрении задачи) в качестве источника краевых волн может быть рассмотрен локальный объем объекта, заключенный в области $\{R \geq z \geq -\lambda_R, x_0 + R + \lambda_R \geq x \geq x_0\}$, где R – радиус кривизны поверхности. Область, в которой происходит преобразование волны Рэлея в объемные моды, может быть рассмотрена как излучатель с распределенными в пространстве фазовыми и амплитудными параметрами. Согласно теоретической модели Викторова [1], при $R_\lambda = R / \lambda_R \geq 5\ldots10$ основные потери энергии RW на преобразование в краевые волны происходят преимущественно при движении волны по РП в слое, ограниченном радиусами R и $R + \lambda_R$. При этом локальную зону РП $dl = C_R dt = Rd\varphi$, проходимую волной Рэлея за сколь угодно малый промежуток времени dt, можно рассматривать как элементарный источник краевых поперечных и продольных мод.

Необходимо отметить, что в известных работах, например [1, 3], отсутствует информация о механизме преобразования RW → EW и данные о соотношении амплитуд излучаемых мод. В то же время для частного случая – непрерывных колебаний и $R_\lambda >> 1$ – Викторовым решена задача об ослаблении поверхностной волны, проходящей по цилиндрической поверхности отрицательной кривизны. Используя это решение, получим функцию источника EW, «генерируемых» поверхностью РП прямоугольного выступа. Так, в отсутствие диссипативных потерь и отражения уравнение баланса потока акустической энергии W_R поверхностной волны, проходящей по РП, имеет вид:

$$dW_R = dW_R(K_{ET} + K_{EL}) = \delta C_R d\tilde{U}_R = (W_{ET} + W_{EL})dl = (C_T U_{ET}\vec{n}_T + C_L U_{EL}\vec{n}_L)\frac{\vec{R}}{R}dl, \qquad (1)$$

где K_{ET} и K_{EL} – коэффициенты преобразования потока энергии RW в потоки энергии поперечной и продольной мод; $\tilde{U}_R$ – плотность потока энергии RW-моды; W_{ET} и W_{EL} – потоки энергии поперечной и продольной мод EW соответственно; $C_T U_{ET}\vec{n}_T$ и $C_L U_{EL}\vec{n}_L$ – векторы Умова-Пойнтинга; C_T и C_L – скорости поперечной и продольной мод EW соответственно; U_{ET} и U_{EL} – плотности потока энергии поперечной и продольной мод, излучаемых с участка поверхности РП длиной dl; $\vec{n}_T$ и $\vec{n}_L$ – единичные векторы направления излучения поперечной и продольной мод EW соответственно.

Предполагаем, что направления излучения краевых мод нормальны поверхности РП, т. е. $\{\vec{n}_T, \vec{n}_L\} \| \vec{R}$. Учитывая сделанные выше предположения и уравнение баланса потока энергии (1), выражение для поля источников поперечных EW, «размещенных» на поверхности S радиусного перехода, может быть представлено в виде

$$\Phi_{ET} = \iint_S \{ \sqrt{\frac{2\gamma_0}{m_R + p_R\varepsilon}}\, P_{R0}\, \varepsilon\, p_R\, (\gamma_0)^{1/2} \times \exp[-R_\lambda \varphi(\gamma_0 - i)]\, (\vec{k}_0\vec{l}_0) \times \exp i(\omega t - \vec{k}\vec{r})\frac{1}{r}\} dS; \qquad (2)$$

$$m_R = \frac{C_T}{C_R};\quad p_R = \frac{C_L}{C_T};\quad \varepsilon = W_{ET} / W_{EL},$$

где γ_0 – коэффициент ослабления RW на длине пути λ_R, который преимущественно определяется кривизной поверхности и слабо зависит от коэффициента Пуассона; $\vec{k}_0$ и $\vec{r}_0$ – единичный волновой вектор и радиус-вектор; P_{R0} – амплитуда волны Рэлея на входе РП; $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения из зоны излучения EW.

Таким образом, для указанных модельных условий область РП пред-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ставляет собой источник излучения продольной и поперечной вертикально поляризованной (в плоскости падения) мод с распределенной по поверхности РП фазой и амплитудой. Если $R_\lambda \to \infty$, то в отсутствие диссипации энергии и расхождения волны амплитуда RW на выходе РП $P_R \to P_{R0}$. Отметим, что с увеличением R_λ расширяется область, занятая источниками краевых волн, и уменьшается удельная диссипация энергии волны Рэлея. При этом увеличивается разность между фазами волны на входе и выходе из РП. Результаты расчетов, согласно рассмотренной выше модели, представлены на рис. 1. (Проведен также расчет и для случая, когда $R_\lambda < 1\ldots2$, т. е. предполагается сохранение подобия механизма преобразования энергии, имеющего место при $R_\lambda >> 1$). С увеличением радиуса РП или эффективной апертуры «излучателя» EW при $R_\lambda > 1\ldots2$ наблюдается изменение структуры поля, сопровождающееся угловым перераспределением акустической энергии в объеме выступа и появлением дополнительных локальных экстремумов, лежащих в области углов $\theta < 0$. При этом глубина «осцилляции» $\Phi_E(\theta)$ изменяется в зависимости от R_λ и составляет от нескольких децибел до десятков децибел, что обусловлено интерференцией источников излучаемых волн. Таким образом, источник EW подобен действию «ограниченной (криволинейной) дифракционной решетки» с угловым периодом $\varphi_D = 1 / R_\lambda$. Причем если $\pi R_\lambda C_R / 2f < 2\lambda_R$, то «осцилляции» $\Phi_E(\theta)$ отсутствуют. Очевидно, что в случае, когда длительность импульса τ и протяженность выступа в направлении распространения волны ограничены, а R_λ достаточно велико, то проявление интерференции ухудшится и «осцилляции» исследуемой зависимости будут сглажены.

Как видно из расчетных данных, большая часть энергии, генерируемой поперечной EW, сконцентрирована в угловой зоне пространства $\theta < 0$.

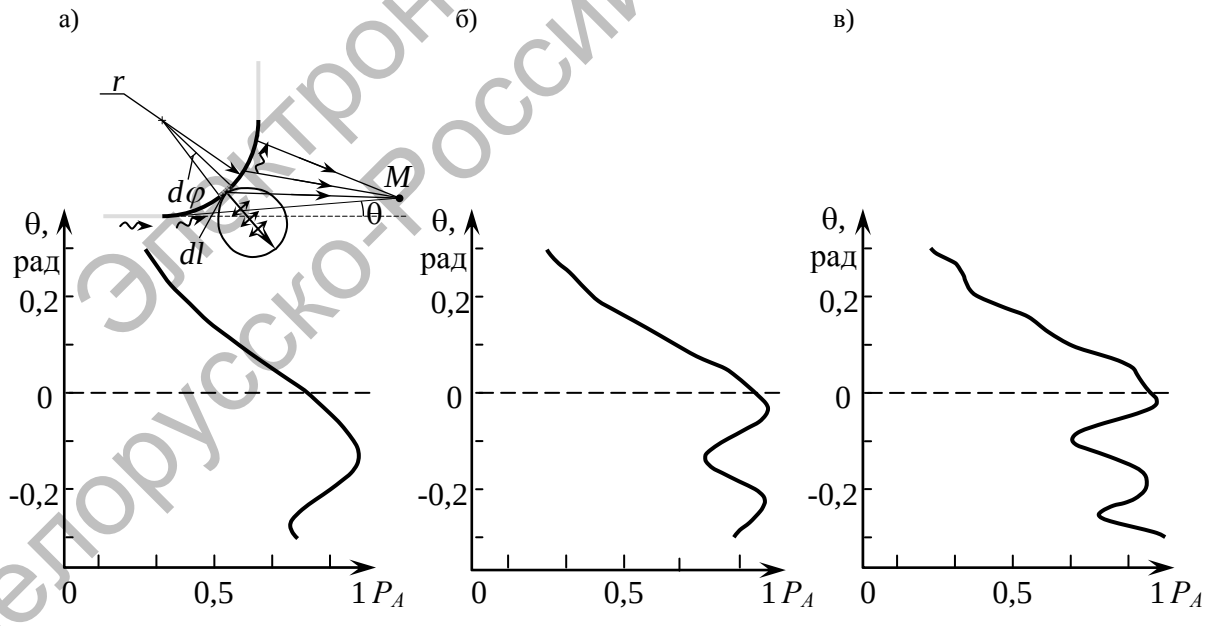

Рис. 1. Схема и результаты расчета поля поперечной краевой волны, генерируемой волной Рэлея на радиусном переходе: а – радиус $R_\lambda = 3$; б – радиус $R_\lambda = 5{,}5$; в – радиус $R_\lambda = 8$

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Необходимо отметить, что в весьма важном для практики случае – $R_\lambda \le 5$ – механизм возбуждения краевой моды по мере уменьшения R_λ будет существенно отличаться от рассмотренного выше. 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. Следует учесть и отражение RW на границе РП, а также различие скоростей RW и EW, что весьма важно, если плоскость падения волны не перпендикулярна образующей поверхности РП. Указанные вопросы и являются предметом экспериментальных исследований.

Методика измерений

Используемые экспериментальные схемы исследований поясняются на рис. 2…5 (трансформация падающих в призме ПЭП продольных волн в рэлеевскую и поперечную моды (см. рис. 2), возбуждение краевой моды при прохождении RW по РП выступа (см. рис. 3), а также эффективность отражения RW от РП для $R_\lambda = 0$ (см. рис. 4)). На рис. 5, а поясняются схемы измерения поля EW в объеме выступа, а на рис. 5, б – измерения амплитуды сигнала от искусственного отражателя при смещении ПЭП относительно выступа. Используемая аппаратура и электронная схема измерений подробно изложены, например, в [4]. Используемые в эксперименте образцы изготовлены из стали. В качестве излучателей используются ПЭП с углом призмы $\beta_R = 64^0$ и диаметром пьезоэлемента $2a$ = 12 мм, рабочими частотами f = 1; 1,8; 4 МГц. Тангенциальные поверхности колебания принимаются ЭМА преобразователем, имеющим ширину намотки провода 1 мм, с установленным над ней самарий-кобальтовым магнитом. Сигнал с ЭМА преобразователя усиливается усилителем У3-33, поступает на вход усилителя дефектоскопа и затем (недетектированный) подается на осциллограф С1-71.

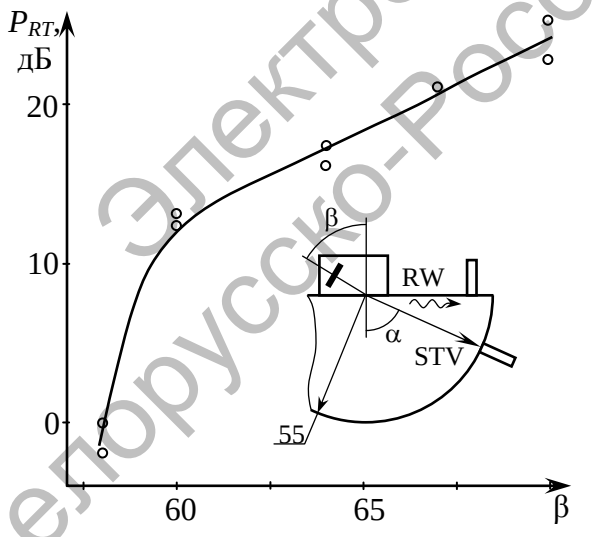

Рис. 2. Отношение амплитуд рэлеевской и поперечной волн в зависимости от угла наклона призмы ПЭП; частота 1 МГц

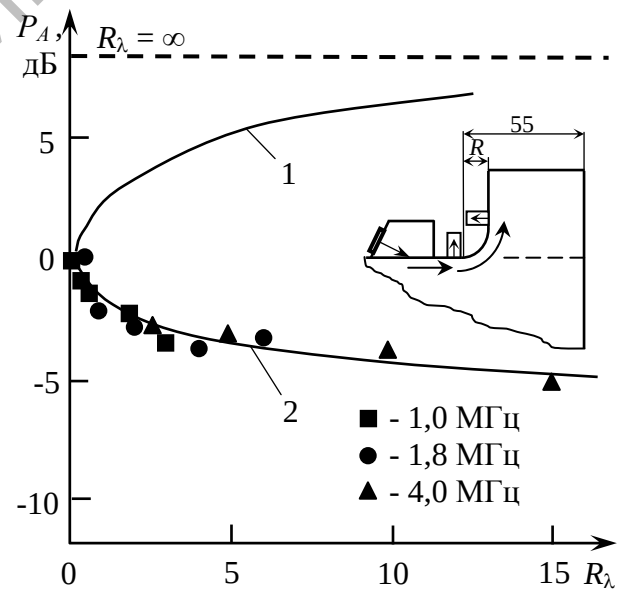

Рис. 3. Амплитуда волны Рэлея, прошедшей через радиусный переход (1), и амплитуда краевой волны, генерируемой волной Рэлея на радиусном переходе (2), в зависимости от радиуса перехода R_λ

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

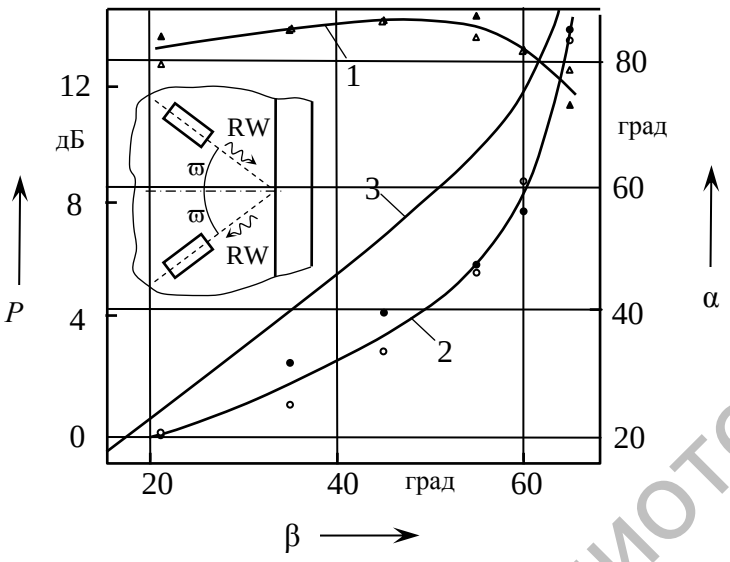

Рис. 4. Амплитуда волны Рэлея, отраженной от свободной поверхности (1) и прямоугольного выступа (2), и угол преломления поперечной волны в объеме выступа (3) в зависимости от угла падения

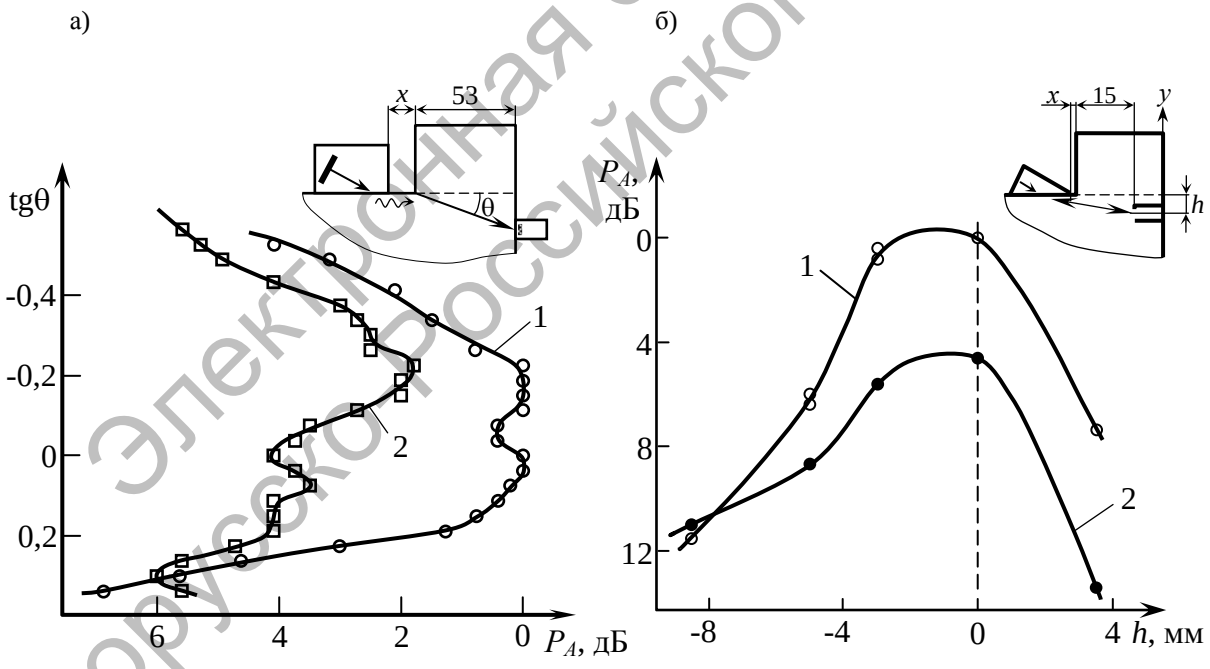

Рис. 5. Поле ПЭП рэлеевских волн с рабочей частотой f = 1 МГц в объеме выступа (а) и амплитуда сигнала, отраженного от плоскодонного дефекта (б) в зависимости от x: а – x, мм = 4 (1); 28 (2); б – x, мм = 0 (1); 30 (2)

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Нормальные поверхности объекта колебания принимаются прямым ПЭП с поперечным размером пьезоэлемента 1,5 мм и магнитным прижимом. При исследовании отношения $P_{RT} = P_R / P_T$ амплитуды рэлеевской P_R к амплитуде поперечной моды P_T в качестве излучателя используется ПЭП с переменным углом ввода и постоянной точкой выхода акустического луча. Данные исследования прохождения RW через РП получены с использованием в качестве приемника сигнала на входе P_{I} и выходе P_{II} малоапертурных ПЭП, причем коэффициент прохождения RW через радиусный переход определяется как $K_R = 20\log (P_{\text{II},\infty} / P_{\text{II}})$, где P_{II} – амплитуда волны Рэлея на выходе РП, а $P_{\text{II},\infty}$ – амплитуда волны Рэлея для $R_\lambda = \infty$, измеренная на расстоянии, соответствующем длине пути по РП.

При измерениях амплитуды волны Рэлея, отраженной от кромки выступа, излучение и прием сигнала осуществляется двумя наклонными ПЭП с углами призмы $\beta = \beta_R$. Исследования формирования поля ПЭП с $\beta = \beta_R$ в объеме выступа (см. рис. 5, а) и зависимости амплитуды сигнала краевой волны, отраженной от вертикальных плоскостных дефектов диаметром 5 мм (см. рис. 5, б), проведены на рабочей частоте 1 МГц при различных положениях ПЭП относительно выступа.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Как показывают экспериментальные данные (см. рис. 2), отношение амплитуд возбуждаемых RW- и STV-мод 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 $P_{RT} \sim 1$, т. е. P_T в области максимума диаграммы направленности ($\alpha = 75\ldots76^0$) сравнима по амплитуде с волной Рэлея. (Амплитуда STV-моды, измеренная на поверхности образца при $\alpha \to 90^0$, на порядок меньше P_R). При $\beta > \beta_R$ заметно превалирует RW-мода, превышающая амплитуду объемной моды на 14…18 дБ в частотном диапазоне 1…3 МГц. При прохождении RW через область РП прямоугольного выступа максимальное уменьшение ее амплитуды в диапазоне $R_\lambda = 0\ldots\infty$ составляет 5…6 дБ (см. рис. 3). То есть роль «вторичной» поперечной моды в формировании результирующего поля в объеме выступа повышается. Что касается коэффициента отражения волны Рэлея от РП, то, согласно данным эксперимента (см. рис. 4) и данным Викторова [1], максимальный коэффициент отражения рэлеевской волны K_R для углов ее падения, близких к нормальному ($2\varpi < 10\ldots20^0$), достигается при $R_\lambda \sim 0$, где $K_R \leq 0{,}1$. Однако с увеличением ϖ величина K_R возрастает, что должно сопровождаться более значимым влиянием вторичной (STV) моды на формируемое в объеме выступа поле. (Этот фактор необходимо учесть, если используется схема измерений «дуэт»). Необходимо также отметить, что при достаточно больших значениях ϖ наличие разницы скоростей RW- и EW-мод вызовет не только сдвиг фаз между модами, но и угловой сдвиг между плоскостями поляризации мод, определяемый законом Снеллиуса (см. рис. 4, кривая 3).

Таким образом, наличие указанных факторов свидетельствуют о необходимости учета влияния «сопутствующей» STV-моды на формируемое в объеме выступа поле. Проблема формирования акустического поля ПЭП волны с углом призмы $\beta = \beta_R$ в объеме выступа с радиусным переходом R подобна задаче о формировании поля ПЭП подповерхностной поперечной волны с углом призмы $\beta = \beta_2$, т. е. результирующее поле может быть представлено как супер-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

позиция полей двух источников:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2,$$

где Φ_1 – поле краевой волны, генерируемой волной Рэлея; Φ_2 – поле «сопутствующей» STV-моды.

Отличительная же особенность настоящего рассмотрения заключается прежде всего в различии отношения амплитуд генерируемых мод источников ($K_{ET} = P_{ET} / P_{STV} \geq\sim 3\ldots4$). Однако при этом надо учесть, что скорость распространения STV-моды больше скорости RW на ~9…10 %, также больше и «эффективная апертура» такого источника в области, лежащей ниже РП [1].

Увеличение расстояния x между ПЭП и РП сопровождается изменением структуры акустического поля вследствие перераспределения акустической энергии в объеме выступа (см. рис. 5). Причем с увеличением x отношение характерных максимумов поля (измеренных согласно схеме на рис. 5) и расстояния между ними являются преимущественно возрастающими функциями. То есть вследствие более значительного ослабления амплитуды объемной волны с расстоянием и при расстояниях, превышающих некоторое характерное x^*, будет практически отсутствовать влияние сопутствующей моды на результирующее поле Φ. В то же время при расположении ПЭП вблизи РП на характерном расстоянии от него x_{ch} и создании оптимальных условий проявления интерференции дифрагирующих волн представляется возможным существенно повысить выявляемость вертикально ориентированных дефектов, лежащих в объеме выступа с $z < 0$, что подтверждается данными эксперимента (см. рис. 5, б).

Выводы

Анализ результатов исследований указывает на возможность использования преобразователей волн Рэлея для проведения контроля объектов со ступенчатыми выступами на наличие как объемных несплошностей, так и плоскостных – с низкой отражающей способностью и ориентированных вертикально; в качестве базовой «зондирующей волны» служит краевая поперечная вертикально поляризованная мода, возбуждаемая волной Рэлея при прохождении ею радиусного перехода.

Экспериментально установлено, что коэффициент преобразования потока энергии рэлеевской волны на прямоугольном выступе в поперечную моду максимален для радиусного перехода $R_\lambda << 1$ и может достигать ~60…70 %.

Показано, что на формируемое в объеме выступа акустическое поле краевой моды (при $\beta \leq \beta_R$) может оказать существенное влияние поперечная мода, возбуждаемая непосредственно ПЭП одновременно с рэлеевской модой и дифрагирующая в окрестности РП. В ряде случаев это может быть использовано для повышения выявляемости дефектов, лежащих в объеме выступа ниже продолжения контактной плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М. : Наука, 1981. – 288 с.

2. **Баев, А. Р.** Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах. Ч. 2. Влияние некоторых граничных условий на формирование акустического поля / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 32–43.

3. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль : справочник в 7 т. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – Т. 3. – 832 с.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

4. **Баев, А. Р.** Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах. Ч. 1. Волны в объектах с плоской свободной границей / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 19–31.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Материал поступил 27.07.2010

A. R. Bayev, M. V. Asadchaya, O.S. Sergeyeva
Peculiarities of excitation and propagation of the rayleigh wave in solids with radial transitions

The peculiarities of the elastic wave excitation and propagation with the usage of Rayleigh wave probes having the βR prism angle are presented. The paper shows the possibility in principle of using such probes for determining not only surface defects but also defects with low reflecting ability, located in the fillet. Dependences of the factor of conversion of the Raleigh wave into edge waves when the surface wave travels across the radial transition are obtained. It is revealed, how the «concurrent» transverse wave excited simultaneously with the fundamental mode influences the resulting field formed in the fillet.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета