

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ КРАЕВЫХ ВОЛН В ОБЪЕКТАХ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Баев А. Р., Сергеева О.А., Парадинец В.В., Гиль Н.Н., Костюк Д.А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
г. Минск, Беларусь, E-mail: baev@iaph.bas-net.by
Брестский государственный технический университет
г. Брест, Беларусь, E-mail: dmitriykostiuk@gmail.com

Большое количество изделий промышленного производства имеют выступы различной геометрии, радиусные переходы (РП), проточки, шлицы и др.. В процессе изготовления таких объектов или при их эксплуатации под воздействием стационарных или переменных механических нагрузок, высоких температур могут возникать потенциально опасные дефекты (поры, трещин, раковины и др.), расположенные как в области сопряжения поверхностей, так и в труднодоступных для проведения традиционного ультразвукового контроля местах [1]. В настоящей работе для выявления таких дефектов предложено использовать подповерхностные вертикально поляризованные поперечные T -волны, обладающие высокой отражающей способностью. Причем их первичным источником служат преобразователи поверхностных акустических волн (ПАВ), возбуждаемых при падении продольной волны на объект под углом $\beta_{ПАВ} = \arcsin(C/C_{ПАВ})$, где C – скорость продольной волны в призме ПЭП, $C_{ПАВ}$ – скорость ПАВ. Последние, как ранее показано, проходя по РП, трансформируются в краевые поперечные T_W -волны, на что обращалось ранее внимание, например, в работах [1,2]. Подробное же исследование формирования акустических полей в объеме выступа, возбуждаемых ПАВ, не проводилось. Также не исследовались вопросы выявления дефектов, расположенных в труднодоступных местах.

В работе представлены результаты теоретического анализа акустического тракта и экспериментального исследования по выяснению механизма возбуждения упругих мод и формирования результирующего поля $\Phi(\alpha)$ поперечных (T) и продольных (L) мод в зависимости от величины R – радиуса РП, угла выступа γ , его высоты h , частоты волны ν (рис. 1). Предложена полуэмпирическая модель и дана трактовка полученным результатам исследований. На заключительном этапе изучены некоторые возможности использования результатов исследований на практике.

В качестве объекта исследований использованы: стальные образцы с углом наклона передней грани выступа $\gamma=180^\circ$ (плоский образец) до $\gamma=35^\circ$ и безразмерным радиусом $R^*=R/\lambda_s=0-10,2$, а также образцы с разной высотой выступа. Кроме того, проведены исследования и на образцах с вертикальным пропилом шириной 0,5 мм, и расположенными под его вершиной искусственными цилиндрическим отверстиями, а также на образце с реальной усталостной трещиной шириной 4 мкм и глубиной 400–500 мкм. (Такие образцы представляют собой частный случай выступа с $\gamma \rightarrow 0^\circ$). Аппаратура, для проведения экспериментальных исследований подобна той, что использовалась в работе [2], а схема и методика измерений поясняются на рисунке 1–3. Прием T -волн производился ЭМА-датчиком, а продольных волн – миниатюрным ПЭП с шириной пьезопластины 1 мм.

В результате экспериментальных исследований впервые установлено, что поле T -волны в объеме выступа является суперпозицией поперечных мод:

$$\Phi_T = \Phi_{TA} + \Phi_{TW1} + \Phi_{TW2}, \quad (1)$$

где Φ_A – поле сопутствующей T -моды, излучаемой преобразователем одновременно с ПАВ; Φ_{TW1} и Φ_{TW2} – поля краевых волн, где Φ_{TW1} формируется в результате возбуждения T_W -моды при прохождении ПАВ по радиусному переходу радиусом R . Как обнаружено, непосредственным источником поля T_W -моды, распространяющейся под углом к нормали передней грани выступа $\phi=33^\circ$, является краевая головная волна. Последняя возникает при трансформации поверхностной волны на РП и

распространяется вдоль передней грани выступа. Причем эти краевые моды одновременно достигают глобальных максимумов при $\gamma = \pi/2$. Установлено, что $\Phi_{TW2} \ll \Phi_T$ при $R_\lambda = R/\lambda_{ПАВ} > 3-4$. С уменьшением же R_λ до нуля вклад составляющей Φ_{W2} в результирующее поле возрастает и обуславливает появление глубоких минимумов поля, описываемых квазилинейной функцией от γ . Последняя в пределах $1-1,5^\circ$ совпадает с расчетной зависимостью, полученной на основе рассмотрения

суперпозиции полей краевых мод: $\alpha_{min} = \Xi - \gamma$, где $\Xi = \Xi(\chi, n)$, где $\chi = \left[\frac{n C_T}{2\pi v R_i} \right]$, а $n = C_L/C_T$.

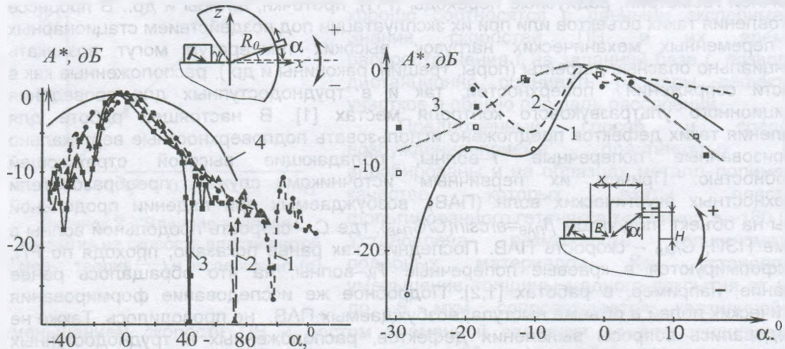


Рисунок 1 – Нормализованное поле поперечных волн в объеме выступа при изменении его угла γ и $R_\lambda \ll 1$: $\gamma = 35^\circ$ (1); 60° (2); 90° (3); $A_T = \cos \alpha$ (4)

Рисунок 2 – Выявление слабоотражающих звук искусственных дефектов диаметром 5 мм Т-модой при разном положении углового положения отражателя: радиус РП R , мм = 5 (1); 10 (2); 0 (3); расстояние до выступа x , мм = 0 (\square); 20 (\circ, \bullet); 30 (\blacksquare); $v = 1$ МГц

Обнаружено, что структура поля для выступов с углом $\gamma = 90^\circ$ претерпевает существенные изменения с увеличением R_λ , что приводит к росту угловой ширины поля, взятой на уровне 6 дБ, практически в ~ 2 раза, некоторому смещению глобального максимума в область больших значений углов приема волны α . Причем обнаруженные осцилляции поля с амплитудой, достигающей 5-6 дБ в области $\alpha < (10-15)^\circ$ вызваны взаимодействием сопутствующей и T_{W1} моды.

В двумерном приближении получено полуэмпирическое выражение для описания поля поперечной моды в некоторой точке объема выступа M с точностью до множителя в виде: $A_T = \int_S F(\omega, t, \tau) \exp[i(\omega t - 2\pi R_\lambda \theta + iR\theta \delta_\lambda)] f_1(\vec{r}) f_2(\phi) ds$, где $F(\omega, t, \tau)$ – функция,

описывающая форму импульса, $\omega = 2\pi v$, \vec{r} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения M из координаты положения элементарного источника излучения краевой волны на РП; δ_λ – коэффициент ослабления ПАВ на длине волны $\lambda_{ПАВ}$; $f_1(\vec{r})$ – функция, характеризующая ослабление амплитуды волны с расстоянием на пути от точки излучения до точки наблюдения; $f_2(\phi)$ – функция направленности элементарного источника излучения с участка поверхности ds .

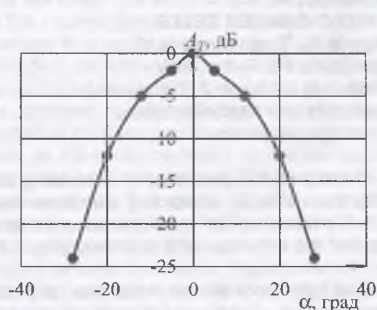
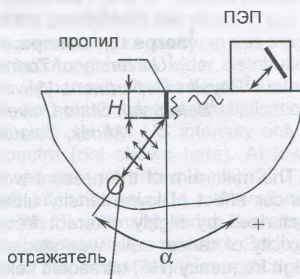


Рисунок 3 – Пример использования T_{II} -моды для обнаружения дефектов под пазом: образец из дюралюминия, $f = 5$ МГц; A_r – амплитуда отраженной волны



На основе выполненного анализа механизма преобразования ПАВ в объемные моды и формирования акустического поля в объеме выступа для $R_\lambda \gg 1$ показано, что в области углов приема $40^\circ > \alpha > -(10-15)^\circ$ наблюдается неплохое соответствие при расхождении $-1-2$ дБ между данными эксперимента и расчета, выполненного согласно предложенной модели, учитывающей влияние сопутствующей моды.

Представленные на рисунке 2 результаты исследования влияния углового положения искусственных вертикально ориентированных плоскостонных отражателей в образце с выступом и различным радиусом РП на амплитуду эхо-сигнала поперечной моды убедительно свидетельствуют об эффективности применения в качестве первичного источника зондирующего сигнала ПЭП волны Рэлея для контроля объектов с технологическими выступами. При этом достаточно легко обнаруживаются слабоотражающие звук дефекты, расположенные в окрестности продолжения контактной поверхности образца ($\alpha=0^\circ$), и (что весьма важно) выше ее на $10-15^\circ$. Кроме того, предложенным способом представляется возможным обнаруживать и поверхностные дефекты, расположенные как в объеме выступа, но и за ним – в результате трансформации мод: ПАВ \rightarrow T_{II} \rightarrow ПАВ \rightarrow ДЕФЕКТ \rightarrow ПАВ \rightarrow T_{II} \rightarrow ПАВ.

Уточнены особенности трансформации ПАВ в T_{II} волну и обратно на усталостной трещине и узком пропиле, рассматриваемом как частный случай выступа с углом $\gamma \rightarrow 0$. Выявлены возможности определения глубины трещины и обнаружения объемных дефектов под пропилом по временным и амплитудным параметрам рассеянных на вершине трещины или технологического паза волн (рис. 3).

Список литературы:

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
2. А.Р. Баев, М.В. Асадчая, О.С. Сергеева, Г.Е. Коновалов. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом / Приборы и методы измерений, БНТУ. – №3. – с. 32–41.