

ВЛИЯНИЕ ОТХОДЯЩЕЙ МОДЫ НА ПОЛЕ КРАЕВЫХ ВОЛН,
ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ НА ВЫСТУПЕ

А. Р. БАЕВ, М. В. АСАДЧАЯ, *О. С. СЕРГЕЕВА, Г. Е. КОНОВАЛОВ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

*ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Минск, Могилев, Беларусь

Значительное число объектов контроля имеют сложный рельеф поверхности – различные технологические выступы, радиусные переходы сопрягаемых поверхностей и пр. (например, валы прессового оборудования, вагонные оси колесных пар, сварные соединения). Нередко такая форма поверхности ограничивает возможности установки преобразователей и создает трудности при введении ультразвуковых колебаний в исследуемую область объекта. В таких случаях возможно использовать преобразователи рэлеевских волн в качестве первичного источника (приемника) поперечных волн, генерация которых происходит вследствие трансформации и рассеяния упругих мод на технологическом выступе.

Несмотря на имеющийся материал теоретических и экспериментальных исследований, вопросы трансформации поверхностных волн (ПАВ) и их рассеяния на выступах различной конфигурации и размеров недостаточно изучены. Данная задача представляет интерес не только для дефектоскопии, но и для других целей в технике ультразвуковых измерений. Так как изучаемые объекты представляют собой волноводы сложной геометрии, знание особенностей прохождения через них различных упругих мод может быть использовано для создания устройств приема и излучения.

В общем случае результирующее поле поперечных волн A_T , возбуждаемых пьезопреобразователем (ПЭП) волн Рэлея в объекте с выступом (рис. 1, а), имеет три составляющие: поперечная волна A_{TE} , трансформированная из волны Рэлея в области сопряжения поверхностей (ОСП) выступа; сопутствующая поперечная волна A_{TS} , возбуждаемая преобразователем одновременно с волной Рэлея; отходящая (боковая) поперечная волна A_{T*} , генерируемая головной волной, трансформированной из волны Рэлея на ОСП выступа.

Как показывают данные экспериментов (рис. 1, б), независимо от рабочей частоты ПЭП при $R_\lambda = R/\lambda_{ПАВ} \approx 0$, где R – радиус ОСП, $\lambda_{ПАВ}$ – длина волны ПАВ, для значений угла выступа $\gamma \leq 90^\circ$ зависимость $A_T(\alpha)$ имеет ярко выраженный минимум, достигающий десятков дБ, в окрестности характерного значения α_{min} . В частотном диапазоне 1–3 МГц положение минимума изменяется не более чем на $4\text{--}5^\circ$ (при погрешности угловых измерений не более 1°). При наличии же радиусного перехода выступа ($R_\lambda \approx 3,5$ и более) глубокий локальный минимум поля и сопровождающие его быстро затухающие осцилляции (характерные для случая $R_\lambda \approx 0$) отсутствуют.

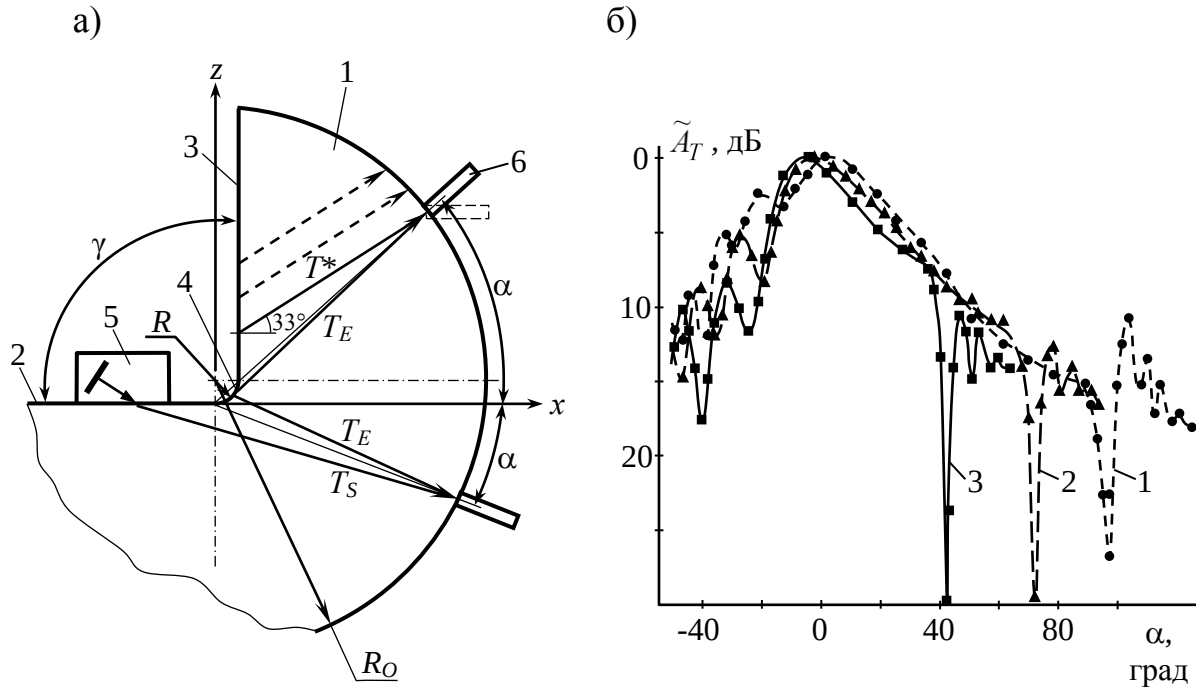


Рис. 1. Пояснение к рассматриваемой задаче (а) и поле поперечных волн в объеме выступа при $R_\lambda \ll 1$ (б): 1 – образец с цилиндрической приемной поверхностью; 2 – контактная поверхность; 3 – внутренняя грань выступа; 4 – ОСП; 5 – излучающий ПЭП; 6 – приемный преобразователь; б) $\gamma=35^\circ$ (1); 60° (2); 90° (3)

Наличие минимума может быть объяснено следующим образом. При трансформации ПАВ на выступе, наряду с рассеянной в области ОСП краевой поперечной модой, возбуждает краевая головная волна (L^*), распространяющаяся вдоль передней грани выступа. Часть энергии этой волны трансформируется в отходящую поперечную T^* -моду [1], которая распространяется под углом $\sim 33^\circ$ к нормали передней грани (рис. 1, а) и приходит в точку приема вместе с T_E -модой. Указанному минимуму амплитуды A_T соответствует фазовый сдвиг между волнами T^* и T_E $\Delta\varphi=\pi$. Предполагая, что один источник (T_E -волна) расположен в окрестности координаты $x=z=0$, а второй (T^* -волна) – на расстоянии s_{L^*} от оси образца на внутренней грани выступа, уравнение для оценки α_{min} имеет вид:

$$t_1 = \frac{R_O}{C_T} = t_2 + \frac{\Delta\varphi f}{2\pi} = \frac{s_{L^*}}{C_L} + \frac{s_{T^*}}{C_T} + \frac{\Delta\varphi f}{2\pi}, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время прихода T_E и T^* -волн соответственно в точку приема (рис. 1, а); R_O – радиус образца; C_T , C_L – скорости поперечной и продольной волн; f – частота; $s_{L^*} = R_O[\sin\alpha_{min} - (1 - \sin^2\alpha_{min})^{0.5} \text{tg}33^\circ]$ – путь, проходимый головной волной вдоль внутренней грани выступа до точки излучения отходящей волны T^* ; $s_{T^*} = (R_O^2 + l_1^2 - 2R_O l_1 \sin\alpha_{min})^{0.5}$ – путь, проходимый далее отходящей поперечной волной T^* в точку ее приема.

По-видимому, подобный эффект имеет место и при формировании поля поперечной волны, возбуждаемой малоапертурным ПЭП со стороны плоской поверхности в полуцилиндрическом образце [2]. При этом, наряду с основной поперечной волной, возбуждается и поперечная отходящая мода, источником которой является сопутствующая головная волна. Результатом взаимодействия этих мод является обнаруженный авторами максимум, а не минимум поля, наблюдаемый в настоящей работе. По-видимому, это различие вызвано особенностями механизма возбуждения мод, обуславливающими другой фазовый сдвиг между ними.

На ход зависимости $A_T(\alpha)$ оказывают влияние ослабление с расстоянием головной волны [1], являющейся источником отходящей моды, размеры образца, частота волны и длительность импульса, а также наклон волнового вектора T^* -моды относительно нормали к поверхности приема. Поле T^* -моды преимущественно зависит от пространственного распределения и силы его источников на поверхности передней грани выступа, определяемых амплитудой и законом ослабления головной волны от длительности импульса, а также частоты волны и геометрии объекта, определяемых безразмерным параметром χ . Экспериментальные исследования зависимости амплитуды головной волны A_L^* от γ показали, что $A_L^*(\gamma)$ достигает максимума при $\gamma=90^\circ$. Установлено также, что головная волна максимальной интенсивности генерируется при радиусе ОСП $R_\lambda \rightarrow 0$, а с ростом R_λ ее амплитуда быстро падает, уменьшаясь более чем на порядок при $R_\lambda \sim 1$.

На основании хода зависимостей $A_T(\alpha)$ в окрестности локального минимума можно оценить вклад в результирующее поле отходящей T^* -моды. Так, например, для $f=1,8$ МГц амплитуда T^* -моды в окрестности α_{min} всего на 8-10 дБ меньше амплитуды максимума исследуемой функции. При значениях γ отличных от 90° , влияние отходящей моды на результирующее поле ослабевает.

Тем не менее, очевидно, что при проведении ультразвукового контроля или измерений (при $\gamma > 90^\circ$) пренебрегать влиянием отходящей поперечной моды недопустимо. В некоторых случаях снижение ее влияния может быть достигнуто путем уменьшения угла выступа или модификации поверхности внутренней грани выступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермолов, И. Н.** Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием / И. Н. Ермолаев, Н. П. Разыграев, В. Г. Щербинский // Дефектоскопия. – 1979. – № 1. – С. 37–40.
2. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А. М. Люткевич [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.