

ция,  $\Delta Y'$ , % – дисторсия,  $Z_m'$ ,  $Z_s'$  – астигматические отрезки; для афокальных систем [дптр, °; ; ']:  $D'$ ,  $\sigma'$  – сферическая aberrация;  $\Delta \omega'$  – дисторсия,  $L_M$ ,  $L_S$  – астигматические отрезки;  $\eta$ , % – неизопланатизм);

– графики остаточных aberrаций: поперечные aberrации в меридиональном и сагиттальном сечении, кривизна поля, дисторсия;

– точечные диаграммы (диаграммы кружка рассеяния), диаграммы волнового фронта, графики MTF (ЧКХ), функции рассеяния;

– дополнительные данные по aberrациям и виньетированию;

Графическая интерпретация оптических характеристик может быть различной: ФРТ изображают в виде карты уровней равной интенсивности, где дополнительно указано число Штреля; MTF обычно показывают в виде двумерной функции для меридионального и сагиттального сечения; ТД представляет картину точек пересечения лучей, равномерно распределенных по зрачку, с плоскостью изображения; фокусировочные диаграммы характеризуют изменение ТД в различных плоскостях установки (в частности, в ПНУ); ФРЛ показывает распределение интенсивности в изображении бесконечно длинной линии в меридиональном или сагиттальном сечении. Вычисление всех характеристик в геометрическом приближении основано на определении поперечных aberrаций для большого количества точек.

Дополнительно в зеркальных системах целесообразно приводить рабочие зоны с учетом «загораживания» зеркальными поверхностями пучков лучей, по которым можно судить о степени

влияния экранирования и виньетирования на качество изображения [7].

Такой классификационный подход к каталогам позволит служить одним из основных факторов сокращения сроков новых разработок.

Он может использоваться не только отдельными специалистами инженерами-оптиками; большинство оптических компаний рано или поздно приходят к необходимости создания архивов своих разработок и классификации этой информации.

1. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учебно-метод. пособие: в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик; Мин-во образования Респ. Беларусь; БНТУ. – Минск, 2007. – Ч. 1: Анализ центрированных оптических систем. – 105 с. (гриф УМО).
2. The Photonics Handbook, Book3, 52nd International Edition, A. Laurin Publication, 2006.
3. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.focus.software.com>.
4. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://fsapr2000.ru>.
5. Лившиц, И.Л. Выбор исходной системы для расчёта объективов / И.Л. Лившиц, А.В. Сальников, Unchung Cho // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 11. – С. 74–78
6. Smith, W.J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems / W.J. Smith. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.
7. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.

УДК 620.179.16

## НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН В УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

Баев А.Р., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е., Гиль Н.Н.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Трансформация волн – явление, играющее важную роль в практике ультразвукового контроля. Как известно, сама возможность возбуждения различных типов волн в твердых телах основана на трансформации мод на границе раздела сред. При распространении в объеме объекта ультразвуковые волны испытывают трансформацию, попадая на стенки или технологические элементы – отверстия, проточки, резкие изменения профиля и т.п. Зачастую трансформация волн мешает при контроле, так как в результате возникает большое количество т.н. ложных сигналов, маскирующих сигналы от дефектов. В других случаях преобразование типов волн осу-

ществляется намеренно (например, в методе Т-тандем) либо используется как признак наличия дефекта.

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. Как показано в [1], в таких случаях возможно использовать преобра-

зователи рэлеевских волн в качестве первичного источника (приемника) поперечных волн, генерация которых происходит вследствие трансформации и рассеяния упругих мод на технологическом выступе.

Установлено, что в общем случае результирующее поле поперечных волн  $A_T$  (рис.1), возбуждаемых пьезопреобразователем (ПЭП) волн Рэлея в объекте с выступом, имеет три составляющие: краевая 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.

Результирующее поле поперечных волн  $A_T(\alpha)$  имеет максимум в окрестности продолжения контактной поверхности образца ( $\alpha \sim 0^\circ$ ), смещающийся на  $5-7^\circ$  при варьировании угла выступа  $\gamma$  в диапазоне  $35-135^\circ$ .

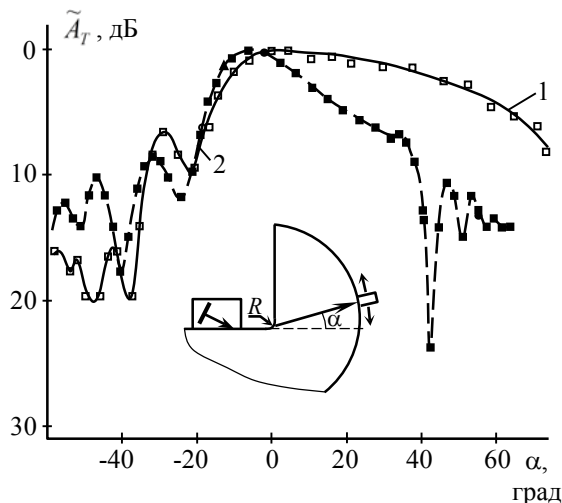


Рисунок 1 – Поле поперечных волн в объеме образца с выступом (угол выступа  $\gamma=90^\circ$ ) и радиусным переходом (1) и без радиусного перехода (2); частота  $f=1,8$  МГц

О возможности использования ПЭП волны Рэлея для выявления дефектов свидетельствуют представленные на рис.2 результаты исследования влияния углового положения модельного дефекта  $\alpha$  на амплитуду отраженного сигнала  $A_T$ . Данные исследования зависимости  $\tilde{A}_T(\alpha)$ , полученные на частотах 1 МГц и 1,8 МГц, указывают на то, что в области  $\alpha > 0$  превалирующее влияние на формирование поля  $\tilde{A}_T(\alpha)$  и выявление модельных дефектов, расположенных в окрестности  $\alpha \sim 0^\circ$  и выше, играет именно краевая поперечная мода.

Установлено также, что при высоте выступа  $h_\lambda \geq 3$  потери на 4-кратную трансформацию ПАВ составляют  $\sim 20$  дБ, что позволяет использовать преобразователи волны Рэлея для обнаружения поверхностных дефектов, расположенных за выступом.

Эффект трансформации ПАВ в поперечную моду и обратно может быть использован для контроля объектов с технологическими выступами на наличие дефектов, контроля параметров трещины, измерения акустических свойств материалов и создания преобразователей поперечных мод.

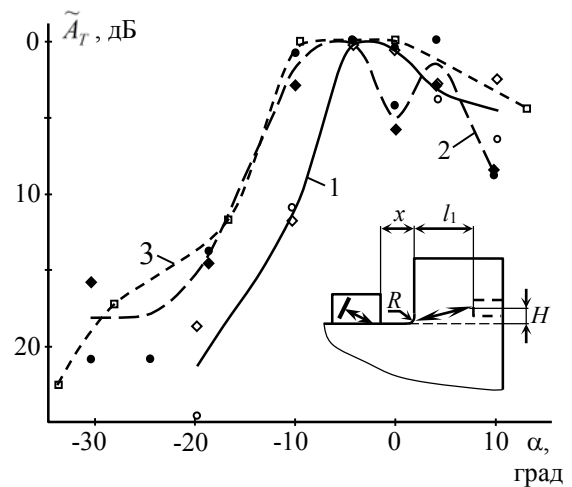


Рисунок 2 – Пример выявления дефектов в образце с выступом преобразователем рэлеевских волн на частоте 1,8 МГц: радиус ОСП  $R$ , мм = 5 (1); 10 (2); 0 (3); расстояние до выступа  $x$ , мм = 20 (○, ●, □); 48 (◇, ◆)

Образец с трещиной или тонким пазом можно рассматривать как модель выступа с углом  $\gamma \sim 0^\circ$ . Данные прозвучивания образца с естественной трещиной глубиной  $\sim 0,4-0,5$  мм позволили установить, что сигнал-отклик представляет собой серию импульсов, приходящих в виде ПАВ на приемный ПЭП. При этом в режиме эхо наблюдаемый на осциллограмме первый импульс является отражением ПАВ от устья трещины, второй же формируется в результате прохождения ПАВ по поверхности трещины и трансформации ее в окрестности вершины в поперечную моду с последующим рассеянием, а затем, после отражения от противоположной поверхности образца, возвращается на ПЭП в обратном порядке. Т.е., ПАВ дважды проходит по стенке трещины и дважды трансформируется на ее вершине. Последующие же импульсы, принимаемые ПЭП, генерируются в результате периодической трансформации на трещине переотражаемых в плоском слое импульсов  $T_E$ -моды. Т.е., в этом

случае основная энергия сосредоточена в поперечной моде, и при очередном переотражении от донной поверхности образца она трансформируется в ПАВ (именно на вершине трещины) и возвращается к приемнику волн.

Таким образом, исходя из полученных данных, временной интервал между первым и вторым импульсами ( $t_{21}$ ), а также между вторым и третьим импульсами ( $t_{32}$ ), наблюдаемыми на осциллограмме, будут равны

$$t_{21}=2H/C_{П\text{АВ}}+(d-H)/C_T+\Delta t; t_{32}=H/C_{П\text{АВ}}+2d/C_T, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина образца;  $H$  – глубина трещины;  $\Delta t$  – временной сдвиг, обусловленный отражением ПАВ от стенки трещины;  $C_{П\text{АВ}}$  – скорость поверхностной волны;  $C_T$  – скорость поперечной волны.

Исходя из (1), предполагается, что в некоторых случаях возможно судить не только о наличии, но и о глубине трещины по величине временных интервалов между переотраженными сигналами – как в теновом, так и в эхо-режиме. Необходимо учесть, что в зависимости от степени контакта стенок трещины (граничных условий) величина  $C_{П\text{АВ}}$  может уменьшаться на 1-2 % [9].

Принципиально возможно также использовать технологические выемки, пропилы и трещины для обнаружения дефектов, расположенных под ними, с помощью трансформированной из ПАВ и рассеянной на вершине пропила поперечной моды. Чувствительность такого способа выявления дефектов, расположенных на расстоянии до 10-15 мм от вершины пропила, может достигать нескольких мм<sup>2</sup>.

УДК 620.179.1+534.1

## ПОЛЕ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ ПРИ НАЛИЧИИ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Сергеева О.С.<sup>2</sup>, Асадчая М.В.<sup>1</sup>, Костюк Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь  
<sup>2</sup>ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь

В практике ультразвукового контроля все более широкое применение находят методики, основанные на использовании пьезопреобразователей (ПЭП) подповерхностных волн, возбуждаемых под первым  $\beta_1$  и вторым  $\beta_2$  критическим углом падения продольной волны на контролируемый объект. Это позволяет выявлять подповерхностные дефекты под грубо обработанной поверхностью, производить тензометрию и структуроскопию твердых тел, а также существенно повысить чувствительность к обнаружению дефектов типа слипание [1-3]. Исследования показали, что поле подповерхностных волн имеет сложную структуру, характеризующуюся тем, что малая часть потока ее энергии локализо-

Как следует из результатов исследований, высокий коэффициент преобразования и легкость конструктивной реализации позволяют использовать эффект трансформации ПАВ $\leftrightarrow$ T-мода для создания преобразователей поперечных горизонтально поляризованных волн как для их приема, так и излучения.

В частности, представляет интерес создание преобразователей, работающих независимо друг от друга на нескольких частотах и имеющих одну и ту же область излучения-приема. Это может быть реализовано путем расположения нескольких ПЭП друг за другом в определенной последовательности и с соответствующей длиной волновода, обеспечивающей требуемую временную задержку между источниками (приемниками) акустического сигнала.

При проведении исследования акустических свойств материалов под воздействием температуры, внешних полей, давления и др. представляет интерес использовать образцы с выступами, являющиеся высокоэффективными трансформаторами ПАВ в объемные моды и обратно. В случае реализации эхо-режима преобразователь ПАВ может быть вынесен за пределы зоны воздействия на испытываемый образец. В некоторых случаях в качестве опорного сигнала можно использовать отражение от ребер выступа.

1. Баев, А.Р. Формирование акустического поля преобразователя волны Рэлея в объекте с выступом. Часть 1. Угол выступа прямой / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, О.С. Сергеева // Дефектоскопия. – 2014. - №6. - С.25-37.

вана в поверхностном слое, а превалирующая – в объеме. При этом ослабление амплитуды  $A$  продольной подповерхностной или головной волны (ВГ) с расстоянием  $x$  в отсутствие диссипативных процессов  $\sim x^{-n}$ , где  $n \approx 1,7-1,8$ , если волна распространяется по поверхности объекта, а в объеме –  $n \sim 1$ . Причина столь сильного ослабления приповерхностного потока ВГ заключается в наличии стока энергии, уносимой отходящей поперечной модой от контактной поверхности в объект под 3-м критическим углом  $\beta_3 \approx 33^\circ$ . Указанные недостатки, а также большое затухание препятствуют применению ВГ для контроля объектов, обладающих низкой скоростью звука, включая полимерные материалы. Представляет