

Как установлено, увеличение толщины УПС (представляющего своеобразный волновод для ППВ) в широком диапазоне углов  $\beta > \arcsin (C_{\text{ПАВ}}/C_L)$  сопровождается ростом отношения  $A_{\text{ППВ}}/A_{\text{ПАВ}}$ , а при  $h_\lambda \sim 2$  и более угловые зависимости практически совпадают. Если же  $h_\lambda < 0,5$ , то с ростом акустической базы наблюдается сдвиг угла максимума амплитуды в область меньших значений. В то же время, аналогичные зависимости, полученные в теневом режиме, практически совпадают при различной базе прозвучивания.

### **Отражатели ПАВ**

Для повышения эффективности контроля УПС и техники ультразвуковых измерений нами предложен способ создания опорного сигнала, реализованный в конструкции отражателя, представляющего собой акустическую нагрузку в виде твердого тела, контактирующего через скользящую границу с объектом. На основе исследования процессов преобразования ПАВ в волну Стоунли и обратно выбрана оптимальная геометрия отражателя, что обеспечивает отношение сигнал-шум не менее 30 дБ. Показана принципиальная возможность применения такого устройства не только для существенного повышения точности измерения указанных амплитудно-угловых характеристик ПАВ, но и измерения скорости импульсно-фазовым методом. Кроме того, такие устройства могут служить в качестве фокусирующих линз и гасителей ПАВ.

### **Список литературы**

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
2. Вopilкин А.Х., Шишов А.П., Ермолов И.Н., Басацкая Л.В. Ультразвуковой способ определения твердости поверхностно-закаленных слоев изделий. Авт. свид. №729503. – Бюлл. изобр., 1980, №15.
3. Баев, А.Р. Измерение глубины слоя, закаленного ТВЧ, ультразвуковым методом / А.Р.Баев, А.Л.Майоров, М.А.Тищенко // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы междунар. науч.-тех. конф., Жлобин, 6-7 сентября 2007 г. / РУП БМЗ. – Жлобин, 2007. – С.110-112.
4. Баев, А.Р. Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, Сергеева О.С. Сергеева, Г.Е. Коновалов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. - №3. - С.15-23.

## **ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЮ УПРУГИХ МОД В МАТЕРИАЛЕ С НИЗКОЙ СКОРОСТЬЮ ЗВУКА**

**Баев А. Р.\*, Асадчая М.В.\*, Костюк Д.А.\*\*\*, Парадинец В.В.\*, Гиль Н.Н.\***

*\*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь*

*\*\*Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь*

[baev@iaph.bas-net.by](mailto:baev@iaph.bas-net.by)

Развитие теории распространения и трансформации упругих волн на границе контакта твердых сред представляет значительный интерес для различных приложений, включая создание приборов и устройств для ультразвуковых измерений, контроля многослойных материалов и др. Очевидно, что один из контактирующих материалов по отношению к другому представляет так называемую акустическую нагрузку (АН), которая может изменить структуру распространяющейся на границе сред поверхностной акустической волны (ПАВ), коэффициент затухания  $\delta$  и скорость ее распространения  $C_{\text{ПАВ}}$ . В

случае, когда можно пренебречь диссипативными процессами и расхождением волны с расстоянием, существуют условия контакта материалов (жесткая и скользящая граница), при которых  $\delta \rightarrow 0$  – т.е. распространяющаяся граничная волна является слабозатухающей (типа волны Стоунли) [1, 2]. При этом необходимо выполнение следующих соотношений, связывающих волновые векторы  $\{k, k^*\}$  (условие I), а также плотность  $\{\rho, \rho^*\}$  и скорость звука  $\{C, C^*\}$  (условие II) в контактирующих средах:

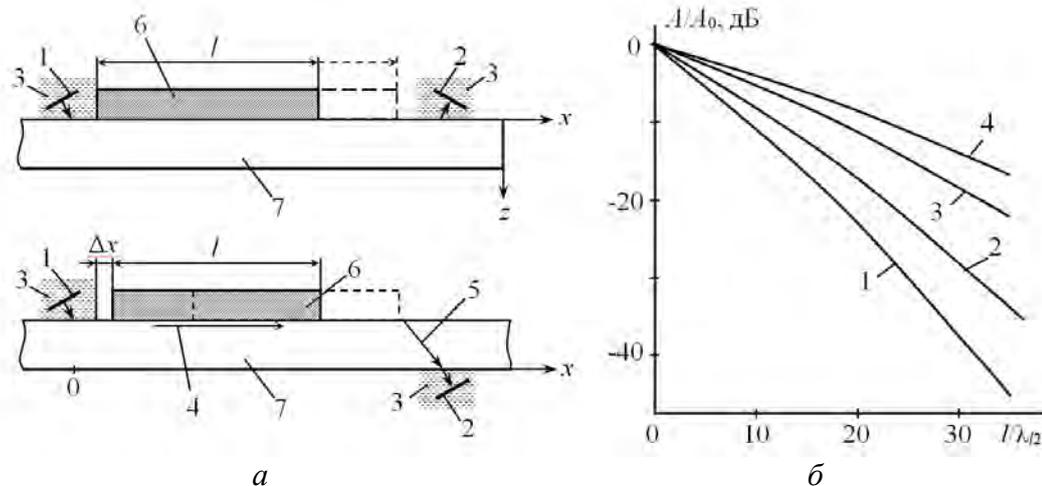
$$(I) k_{St} > k_t, k_t^*; (II) \{\rho/\rho^* < 1, C/C^* > 1\} \text{ или } \{\rho/\rho^* > 1, C/C^* < 1\}, \quad (1)$$

где знак \* относится к материалу, в котором производится возбуждение упругой моды, индексы  $t$  и  $St$  – к поперечной волне и волне Стоунли.

В упомянутых выше случаях предполагалось, что первичным источником слабозатухающей волны является волна Рэлея, возбуждаемая преобразователем (ПЭП) с углом призмы  $\beta_R = \arcsin(C_1/C_R)$ , где  $C_1$  – скорость УЗК в призме ПЭП. В настоящей работе на основе проведенного теоретического анализа высказано предположение о возможности существования на границе твердых тел слабозатухающей волны, условие существования которой существенно отличается от приведенного выше –  $k_t^* < k < k_t$ . Возбуждение этой моды производится под первым критическим углом падения продольной волны  $\beta_1 = \arcsin(C_1/C^*)$  в материале с низкой скоростью звука  $C^*$  и малой плотностью  $\rho^*$ , при которых  $\rho^*/\rho < 1$  и  $C^*/C < 1$ . Необходимо отметить, что в отсутствие АН изменение амплитуды продольной подповерхностной волны (ПВ) с расстоянием вдоль оси  $x$  на свободной поверхности происходит по закону  $A \sim \exp(-\delta x)x^n$ , где  $\delta$  – коэффициент ослабления волны, вызванный диссипативными потерями, а  $n \sim 1,6-1,8$ . Причем дополнительные потери энергии обусловлены боковой поперечной волной, отходящей под углом  $\sim 33^\circ$ , необходимость существования которой вызвана наличием нормальной составляющей смещений  $\xi_n$ . Подавляя же последнюю путем создания АН, следует ожидать изменения диаграммы направленности  $\Phi(\alpha)$  источника продольной ПВ и существенного повышения плотности потока акустической энергии в приповерхностной области базового образца.

### Методика исследований

Для проверки гипотезы проведены исследования и уточнен механизм влияния длины АН и ее положения на преобразование мод, в том числе генерацию боковых поперечных волн, отходящих от поверхности в основной образец (рис. 1а).



**Рис.1.** Экспериментальные схемы (а) и влияние стальной АН (б) на ослабление ППВ с расстоянием в плексигласе: (а) 1, 2 – излучающий и приемный ПЭП; 3 – водная призма; 4 – ППВ; 5 – боковая волна; 6 – АН; 7 – образец из оргстекла; б) 1 – АН отсутствует; 2 – АН оргстекло; 3 – АН сталь толщиной 1–30 мм; 4 – головная волна в объеме материала

Материалом основы служило органическое стекло, а образцы АН выполнены из этого же материала, стали, алюминия, латуни, так что отношение удельных акустических сопротивлений варьировалось в диапазоне  $\varepsilon = \rho C / \rho^* C^* = 0-10,2$ . Возбуждение ПВ в объекте производится на частоте 1 МГц через жидкую задержку (воду). Скользящая граница раздела сред моделируется путем контакта материалов через тонкую водную прослойку. Направленность поля излучения ПВ измеряется миниатюрным датчиком (ширина пьезопластины 1,5 мм), перемещаемым в вертикальном направлении по поверхности торца образца с помощью специального магнитного прижимного устройства. Измерение амплитуды исследуемого поля производилось со сдвигом 1,5 мм от плоскости контактной поверхности.

Также измерялось импульсно-фазовым методом относительное изменения скорости ПВ при воздействии АН и расположении приемного ПЭП как на базовой поверхности образца, так и на торцевой поверхности. Измерение изменения времени распространения продольной ПВ проводилось на базе стандартных блоков ультразвукового дефектоскопа, осциллографа и измерителя временных интервалов И1-8.

### Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

Опытные данные подтверждают результаты проведенного выше краткого анализа проблемы и гипотезы, касающиеся распространения квазипродольной слабозатухающей моды в окрестности границы раздела сред, а также возможность управления полем ПЭП путем изменения положения АН на образце. Так, в отсутствие АН амплитуда волны в окрестности угла приема волны  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  более чем на порядок меньше ее амплитуды в области максимума. Наличие же АН существенно изменяет структуру поля излучения ПЭП и плотность энергии волны в окрестности  $\alpha \rightarrow 90^\circ$ . Установлено, что по мере увеличения удельного акустического сопротивления и длины акустической нагрузки (оргстекло, латунь, сталь) происходит повышение плотности потока энергии в приповерхностной зоне. Так, варьирование безразмерной длины стальной АН в диапазоне  $l_\lambda = l / \lambda_{l2} = 0-33$  сопровождается смещением максимума поля  $\alpha_m$  к плоскости контактной поверхности более чем на  $15^\circ$  и ростом амплитуды ПВ в окрестности  $z \sim 0$  более чем на 25 дБ (рис.2). При этом законы ослабления исследуемой моды, распространяющейся в окрестности контактной поверхности и вдали от нее в объеме материала, становятся близки друг к другу (рис.1б).

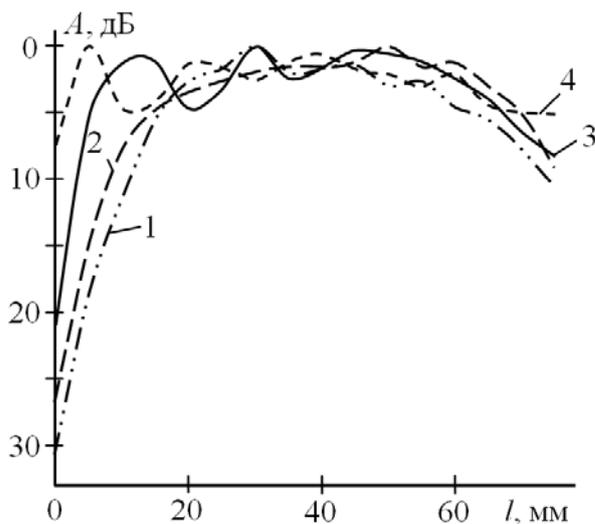


Рис. 2. Поле излучения ПВ при разной длине акустической нагрузки:  $l$ , мм = 0 (1); 20 (2); 50 (3); 94 (4)

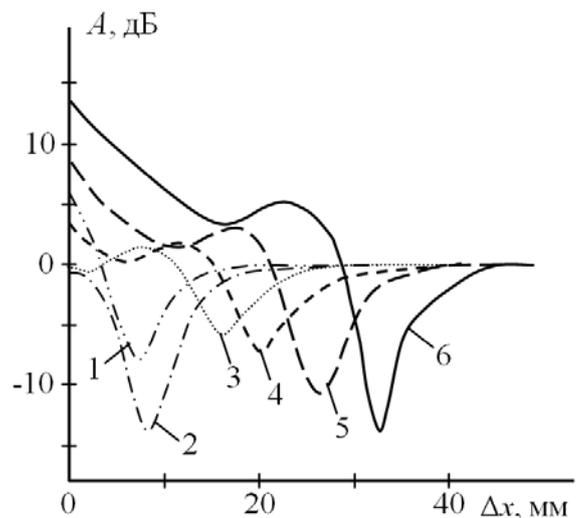


Рис. 3. Амплитуда боковой волны в зависимости от положения стальной АН:  $l = 36$  мм; положение приемного ПЭП  $x$ , мм = 60 (1); 65 (2); 70 (3); 75 (4); 80 (5); 85 (6); 90 (7)

Наличие акустической нагрузки также вызывает уменьшение скорости ПВ на величину ~1%, что имеет место для волн Стоунли, распространяющихся в двухслойных объектах, но, как указывалось выше, условия их распространения (согласно классическим представлениям) имеют существенные отличия. Необходимо обратить внимание также на тот факт, что наличие АН приводит к изменению скорости волны не только на поверхности образца ( $z=0$ ), но и по его глубине – в диапазоне углов приема  $\alpha = 60-90^\circ$ . Варьирование толщины контактной прослойки сопровождается весьма значимым изменением формируемого поля в окрестности поверхности образца (~5–7 дБ). Следует обратить внимание на то, что уменьшение скорости волн, распространяющихся на границе материалов, наблюдается и в случае, когда материал АН дюралюминий, удельное акустическое сопротивление которого в ~2,5 раза меньше чем у стали, но в 4,6 раз больше, чем у плексигласа. При этом наличие АН вызывает не усиление, а ослабление амплитуды волны на величину ~8–9 дБ.

По мере перемещения АН наблюдается смещение характерных экстремумов зависимости амплитуды  $A(x)$  приемного ПЭП 2, расположенного неподвижно, но на разных расстояниях (по  $x$ ) от источника излучения (рис.3). Исходя из полученных данных, следует заключить, что АН играет своеобразную роль линии задержки и “накопителя” поверхностной энергии.

Эти данные свидетельствуют о сложности механизма трансформации и дифрагирования волн при изменении рассмотренных граничных условий и требуют дополнительных исследований для понимания этого явления.

#### Список литературы

1. Stoneley, R. Elastic waves at the surface of separation of two solids / R. Stoneley // Proc. Roy. Soc. London A. – 1924. – 106. - P. 46–429.
2. Белубекян, М.В. Об условии существования волн Стоунли при скользящем контакте / Изв. АН Арм.ССР. Механика. – 1990. - Т.43. - №4. - С.52-56.
3. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. - М.: Наука, 1981. - 288 с.

### ВЛИЯНИЕ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПИРОСТАНАТА ВИСМУТА $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$ ( $x = 0,05; 0,1$ )

Аплеснин С.С.<sup>1,2</sup>, Удод Л.В.<sup>1</sup>, Ситников М.Н.<sup>2</sup>, Еремин Е.В.<sup>1</sup>,  
Молокеев М.С.<sup>1,3</sup>, Тарасова Л.С.<sup>4</sup>, Галяс А.И.<sup>5</sup>, Янушкевич К.И.<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск

<sup>3</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

<sup>4</sup>Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск

<sup>5</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

[kazimir@ifftp.bas-net.by](mailto:kazimir@ifftp.bas-net.by), [luba@iph.krasn.ru](mailto:luba@iph.krasn.ru)

Разработка новых катализаторов и газовых сенсоров на основе полупроводниковых неорганических материалов, является актуальной задачей по причине востребованности в промышленности [1–6]. Управление электронной структурой полупроводникового сенсорного материала позволяет стимулировать взаимодействие его с определяемым газом и предоставляет дополнительные возможности для увеличения селективности полупроводниковых газовых сенсоров.