

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 слипания [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, обеспечивающих 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

интерес изучить возможности повышения эффективности их контроля, управляя структурой поля ВГ путем изменения граничных условий на поверхности объекта. Прежде всего, необходимо обратить внимание на то, что потери энергии потока ВГ, вызванные отходящей поперечной модой, генерируются лишь при наличии нормальной составляющей смещений  $u_{z2}$ . Поэтому, если предположить, что если

$$u_{z2} \ll u_{t2}, \quad (1)$$

где  $u_{t2}$  - тангенциальная составляющая скорости на поверхности объекта, то следует ожидать изменения поля излучения ПЭП  $\Phi(\alpha)$  ВГ и существенного повышения плотности потока акустической энергии в области  $\alpha \rightarrow \pi/2$ . А это является весьма актуальным при контроле значительного числа объектов. Очевидно, что условие (1) может быть реализовано: а) при наличии на поверхности объекта акустической нагрузки (АН), обеспечивающей граничные условия, близкие к "скользящей границе"

$$\sigma_{t1} = \sigma_{t2} = 0, \quad \sigma_{z1} = \sigma_{z2}, \quad u_{z1} = u_{z2}, \quad (2)$$

где для составляющих тензора тангенциальных ( $\sigma_t$ ) и нормальных ( $\sigma_z$ ) напряжений индекс 1 относится к поверхности тела, создающего акустическую нагрузку, 2 – базового объекта; б) при превалировании величины удельного акустического сопротивления материала нагрузки ( $R_1 = \rho_1 C_1$ ) над соответствующей величиной исследуемого объекта ( $R_2 = \rho_2 C_2$ ) Т.е., предполагается, что  $N = R_2/R_1 \ll 1$ .

В работе проведен теоретический анализ и экспериментальные исследования распространения ВГ, когда удельное акустическое сопротивление материала АН достаточно большое ( $N \ll 1$ ), и выполняются граничные условия, преимущественно близкие к "скользящей границе", а также "жесткой границе" ( $\sigma_{t1} = \sigma_{t2}$ ,  $\sigma_{z1} = \sigma_{z2}$ ,  $u_{z1} = u_{z2}$ ,  $u_{t1} = u_{t2}$ ). Анализ известных работ и полученных выражений для рассматриваемого класса задач [4-6] показал отсутствие условий для распространения слабо затухающих волн типа волн Стоунли (ВС) в окрестности границы сред при выполнении указанных выше граничных условий для контактирующих твердых тел. В то же время выдвинутая нами гипотеза о возможности существования такой волны основывается на том, что при  $N \ll 1$  и выполнении граничных условий (1)-(2) настоящая задача близка к той, что имеет место для слабозатухающей волны Стоунли, распространяющейся вдоль границы жидкость-твердое тело. Т.е., для описания распространения преимущественно продольной моды ВГ в окрестности границы сред предложена "жидкостная модель" Викторова В.И [6].

На рис.1 представлена упрощенная схема экспериментальных исследований, позволяющая моделировать как указанные выше граничные условия (скользящая и жесткая), так и плавно изменяющиеся (во времени) условия. Последнее достигается при отвердевании клеящей композиции, вводимой между плексигласом и АН. Установка содержит излучатель ВГ(1), АН (2), базовый образец из плексигласа (3), приемник колебаний (4). Некоторые данные исследований (рис. 2 и 3) убедительно подтверждают высказанную гипотезу о возможности существования определенных условий, для которых в окрестности границы твердых тел существует слабо затухающая квазипродольная волна.

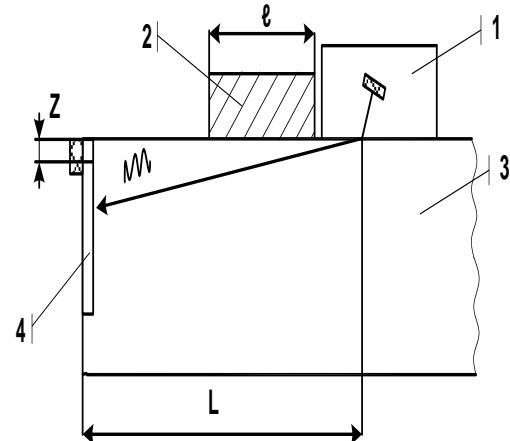


Рисунок 1 – Схема эксперимента

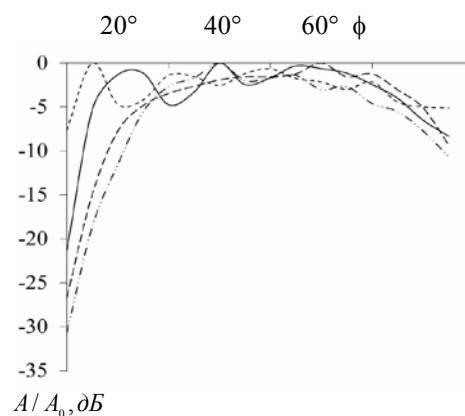


Рисунок 2 – Влияние длины акустической нагрузки на поле излучения головной волны:  $l, 10^{-2} \text{ м} = 0$  (1); 0,02 (2); 0,05 (3); 0,094 (4)

Показано, что именно в рассмотренном случае ослабление с расстоянием ГВ и ее поле в базовом образце близко к "свободному полю" объемной волны, возбуждаемой в докритическом режиме. Важным для выше выдвинутой гипотезы и подтверждающим ее является тот факт, что варьирование безразмерной толщины АН (стальной пластины) вплоть до  $h \sim (0,3-0,4)\lambda_l$

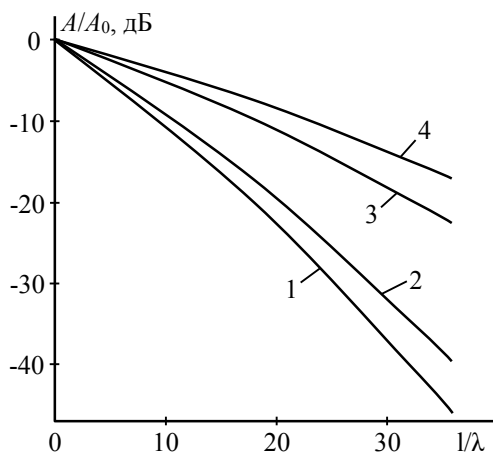


Рисунок 3 – Влияние АН на ослабление ВГ в плексигласе: АН – нет (1); АН - плексиглас (2); АН - сталь толщиной 0,5-30 мм (3); ВГ в объеме образца (4)

практически не сказывается на амплитудных и угловых параметрах поля излучения ПЭП. При этом наблюдается существенное перераспределение потока акустической энергии в окрестности границы сред. В пользу жидкостной модели служит и тот факт, что расчетное значение величины  $\Delta C = C - C_0$ , полученное при воздействии АН, является отрицательным, и оно всего на 20% отличается от полученного в эксперименте. Установлено, что варьирование толщины жидкой звукопроводной прослойки между объектом и телом АН может также приводить к достаточно

УДК 620.179.1+534.1

### ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПО ДАННЫМ АМПЛИТУДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Сергеева О.С.<sup>2</sup>, Майоров А.Л.<sup>1</sup>, Парадинец В.В.<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

Большинство используемых на практике ответственных изделий машиностроительной, станкостроительной, авиационной промышленности, на транспорте и др. подвергаются поверхностному упрочнению путем термической, химико-термической и механической обработки, что обеспечивает их высокую прочность и долговечность. При этом глубина  $h$  упрочненного поверхностного слоя (УПС) может изменяться в диапазоне от десятков мкм до нескольких десятков мм, что, как правило, контролируется разрушающим методом и не дает достаточных гарантий качеству выпускаемой продукции. Известные же методы неразрушающего контроля (электромагнитные, токовихревые и др.), а также основанные на отражении ультразвуковых волн от границы УПС, не нашли широкого применения, что вызвано отсутствием

значимым изменения поля ВГ. Однако в этом случае механизм пространственного перераспределения поля излучения ПЭП совершенно другой и обусловлен проявлением эффекта волнового резонанса в жидкой прослойке.

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2003. – 864 с.
2. Ермолов И. Н., Разыграев Н.П., Щербинский В. Г. Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием. - Дефектоскопия, 1979, №1, с.37-40.
3. Баев А. Р., Асадчая М. В. Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах. Часть 2. Влияние некоторых граничных условий на формирование акустического поля - Дефектоскопия, №9, 2005, стр. 32-43.
4. Белубекян М.В. Об условии существования волн Стоунли при скользящем контакте. - Изв. АН Арм.ССР. Механика, 1990, т.43, №4, с.52-56.
5. Аббакумов К.Е., Коновалов Р.С. Распространение акустических волн Стоунли в области границы твердых полупространств при нарушенном акустическом контакте.- Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003, №1, С. 10–16.
6. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981. - 289 с.

надежной корреляции между информативным сигналом и глубиной УПС.

В ГНУ «ИПФ НАН Беларуси» разрабатываются на современной базе новые высокоэффективные средства ультразвукового контроля УПС и внедряются как для контроля стальных, так и чугунных изделий, имеющих плоскую, цилиндрическую, винтовую, зубчатую форму упрочняемой поверхности. При этом в качестве базового информативного параметра используется скорость  $C_R$  поверхностной волны (ПАВ) и поперечной подповерхностной волны (ППВ), хорошо коррелирующих с твердостью металла  $B$ . При этом обеспечивается точность измерения  $h$  в пределах 7-15 %. Проведение настоящих исследований направлено как на выявление возможностей повышения надежности и достоверности измерений, так и на упрощение используемой (прецизионной и дорогостоящей)