

чения толщины покрытия происходит термическая активация напыляемой поверхности и уменьшение теплопередачи от расплавленной капли в подложку. В результате увеличивается степень деформации частиц и снижение пористости слоя.

Рассматривая эффективность работы ТЗП целесообразно оценивать их тепловое сопротивление, которое прямо пропорционально их толщине и обратно пропорционально его теплопроводности  $\Delta/\lambda$ . Эту величину можно расценивать как коэффициент эффективности ( $K_{эф}$ ), величина (табл. 2) которого получена обработкой данных таблицы 1.

Таблица 2. Коэффициент эффективности использования теплозащитных покрытий

| Температура, °С                      | 50   | 150  | 250  | 350  | 450  | 550  | 650  |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,3мм | 0,26 | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,6мм | 0,40 | 0,38 | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,32 |
| ZrO <sub>2</sub> 0,3мм               | 0,67 | 0,55 | 0,50 | 0,50 | 0,46 | 0,43 | 0,43 |
| ZrO <sub>2</sub> 0,6мм               | 0,86 | 0,80 | 0,75 | 0,71 | 0,67 | 0,63 | 0,63 |

Из данных таблицы 2 видно, что эффективность работы покрытий увеличивается с ростом их толщины, несмотря на некоторое увеличение теплопроводности слоев, однако при использовании покрытий из двуоксида циркония темпы роста  $K_{эф}$  не так заметны, как на покрытиях из оксида алюминия. В исследованном диапазоне температур  $K_{эф}$  покрытий из ZrO<sub>2</sub> в два раза больше, чем из AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант 15-0800375).*

#### Список литературы

1. Абрамов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1993.- 336 с.
2. Материалы в машиностроении, т.5. Неметаллические материалы. Справочник под ред. Попова В.А.- М. Машиностроение, 1968.-544 с.
3. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. -М.: Мир, 1968.-464 с.
4. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта в зоне разъемных и неразъемных соединений. -М.: Энергия, 1971.-216 с.
5. Васильев Л.Л., Фрейдман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. - М.:Наука, 1967. -260с.

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АМПЛИТУДНО-УГЛОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

**Баев А. Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е.**

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь  
[baev@iaph.bas-net.by](mailto:baev@iaph.bas-net.by)*

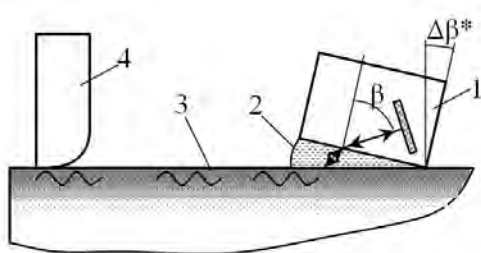
Неразрушающий контроль (НК) физико-механических свойств поверхности, включая структуру, прочность и глубину упрочняющего слоя, износостойкость и др., является актуальной задачей современного промышленного производства. Один из эффективных методов НК основан на зондировании исследуемого объекта упругими волнами ультразвукового диапазона, параметры которых (скорость, затухание и др.) хорошо коррелируют с указанными свойствами. В частности, это касается задачи определения глубины  $h$  упрочненного поверхностного слоя (УПС) по данным скорости поверхностной волны

(ПАВ) и ее дисперсии [1], по положению экстремумов поперечной подповерхностной волны, обусловленных эффектом рефракции [2], по максимуму угла отражения от УПС [3], определению времени распространения поперечной моды до границы УПС, характеризующей скачком балльности зерна металла [1]. В работе [4] сообщалось о возможности использования амплитудного метода НК, реализуемого путем исследования амплитудно-угловых зависимостей  $A(\beta)$  ПАВ, а также зависимости амплитуды поперечной подповерхностной волны (ППВ) от расстояния  $A(L)$ .

Совершенствование указанного метода потребовало проведения дальнейших исследований, направленных на расширение его технических возможностей и оптимизации условий проведения контроля. В отличие от известных подобных исследований поверхности материалов с однородной структурой, в рассматриваемом случае требуется учитывать неоднородность поверхностного слоя, высота которого может изменяться от нуля до нескольких длин волн ( $\lambda_{\text{ПАВ}}$ ). При этом существенное влияние на зависимости  $A(\beta)$  и  $A(L)$  могут оказать эффекты рефракции, а также кривизна объекта, ограничивающие применение метода. Кроме того, как показывает анализ акустического тракта измерительной системы, при реализации метода наиболее эффективным является эхо-режим прозвучивания объекта. Именно в этом случае представляется возможным существенно уменьшить зону прозвучивания объекта - до 30 мм, однако это требует проведения дополнительных исследований. Указанные вопросы и рассматриваются в настоящей работе, методика и экспериментальная установка для исследований подобны изложенным в работе [4].

### Влияние глубины УПС на параметры акустического сигнала при изменении угла падения волны и условия реализации амплитудно-углового метода

Оценка глубины УПС может быть проведена по сдвигу угла экстремума функции  $A_{\text{ПАВ}}(\beta)$ , для которой, как обнаружено, величина  $\beta_h = \frac{d\beta_m}{dh}$ , характеризующая чувствительность метода, является преимущественно монотонно убывающей функцией. Если же  $h > 2\lambda_{\text{ПАВ}}$ , то  $\beta_h \rightarrow 0$  - т.е. область трансформации мод и локализации энергии ПАВ (по глубине) можно считать неизменной. Максимальная же амплитуда зондирующего сигнала увеличивается не более чем на 1-2 дБ, что обусловлено преимущественно уменьшением балльности зерна в области УПС. Основная причина отклонения максимума угла призмы ПЭП от некоторого начального значения, сопровождающееся уменьшением амплитуды сигнала при наличии УПС, вызвана уменьшением скорости ПАВ в объекте и рассогласованием движения следа падающего акустического луча в призме и поверхностной волны в объекте. Уменьшение же скорости волны вызвано преимущественно изменением эффективного значения модуля Юнга  $E$  и плотности  $\rho$  УПС, причем  $\{\partial E/\partial h, \partial \rho/\partial h\} < 0$ , а  $\partial E/\partial h < (E/\rho)\partial \rho/\partial h$ . Если имеется небольшое отклонение угла падения волны на объект  $\Delta\beta$ , вызванное изменением глубины УПС на некоторую величину  $\Delta h$ , то  $\Delta\beta \sim \frac{n^2}{\sqrt{1-n^2}} \frac{\partial C_{R,T}}{\partial h} \frac{\Delta h}{C_R}$ ,



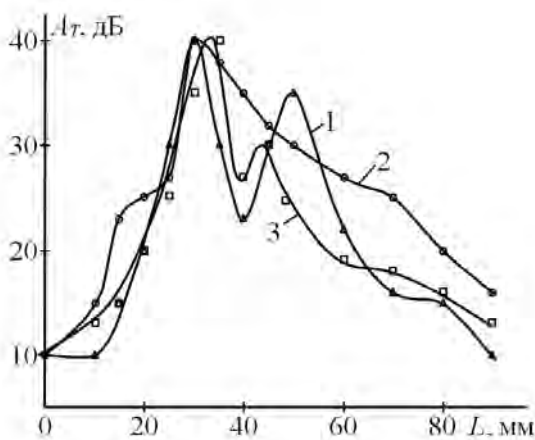
**Рис. 1.** Схема измерений в режиме отражения с жидкостным клином: 1 – ПЭП; 2 – жидкостный клин; 3 – упрочненный слой; 4 – отражатель

где  $n = C_{\text{ПАВ},T}/C_L$ . Как показывает анализ, требуемая точность измерений глубины УПС в пределах  $\sim 15\%$  может быть обеспечена при установке угла падения волны  $\beta$  с погрешностью  $\sim 0,1-0,2^\circ$ , что может быть достигнуто путем использования, например, ПЭП на фазированных решетках. Подобная точность установки угла ПЭП может быть достигнута также путем ввода УЗК через локальную иммерсионную ванну либо жидкий клин, создаваемый между призмой ПЭП и объектом (рис. 1).

Настоящий метод может быть реализован как на объектах с плоской, так и с цилиндрической поверхностью радиусом до 7–8 мм (при прозвучивании вдоль оси объекта). Однако, при характерных значениях безразмерных значений радиуса кривизны объекта  $R^* = R/\lambda_{\text{ПАВ}}$ , длины акустической базы  $L^* = L/\lambda_{\text{ПАВ}}$  и длительности сигнала  $\tau$  может проявляться эффект интерференции, обусловленный взаимодействием 3-х мод ПАВ: волны, распространяющейся вдоль образующей цилиндра, и двух вращающихся мод. Этот эффект может существенно усложнить измерительную процедуру при определении скорости ПАВ или ППВ импульсно-фазовым методом. В то же время простота реализации интерференционного процесса – путем изменения длины акустической базы или частоты сигнала – может быть использована в технике ультразвуковых измерений на объектах с небольшими значениями  $R^*$ , где эффект проявляется более ярко.

### Эффекты рефракции и метод переменной акустической базы

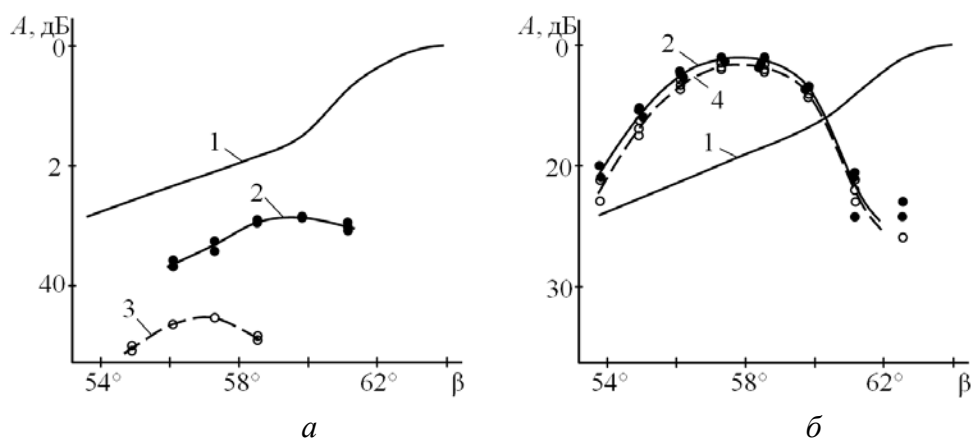
Наличие неоднородного поверхностного слоя может оказать существенное значение



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды поперечной волны от расстояния до отражателя в объекте с УПС с  $h_\lambda \approx 5$ ; угол падения волны  $\beta = 23^\circ$  (1);  $25,5^\circ$  (2);  $26^\circ$  (3)

на формируемое поле ППВ в объекте в результате проявления явления рефракции, что может быть использовано для определения глубины УПС и иллюстрируется на рис. 2, 3. Прежде всего, как экспериментально установлено, с увеличением глубины УПС амплитуда ППВ существенно возрастает и в области 2-го критического угла может превосходить амплитуду ПАВ в несколько раз. При этом наклон кривой  $A_{\text{ППВ}}(L)$ , определяемый характерным значением  $A_L = |dA/dL|$ , возрастает с ростом безразмерной толщины слоя  $h_\lambda = h/\lambda$ , а функция  $F^*(l) = 20\lg(A_{\text{ППВ}}/A_{\text{ПАВ}})$  изменяется по закону, близкому к линейному, и является однозначной зависимостью до тех пор, пока  $h_\lambda \leq h_\lambda^* = 2,6-2,7$ . При  $h_\lambda > h_\lambda^*$  начинают проявляться эффекты интерференции, обусловленные взаимодействием опорного луча с рефрагировавшим (рис.2). На рис.3 представлены характерные амплитудно-угловые зависимости ПАВ и ППВ, полученные в режиме отражения от вертикальной грани образца при различном расстоянии от него.

терные амплитудно-угловые зависимости ПАВ и ППВ, полученные в режиме отражения от вертикальной грани образца при различном расстоянии от него.



**Рис. 3.** Угловые зависимости поверхностной (1) и поперечной подповерхностной (2–4) волн на частоте 5 МГц в режиме отражения в "сыром" образце (а) и образце с упрочненным слоем (б) глубиной  $h = 1,5$  мм; расстояние  $x$ , мм = 20 (1, 2); 30 (3); 40 (4)

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