

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СЦЕПЛЕНИЯ И ТОЛЩИНЫ КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

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

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

г. Минск, Беларусь, E-mail: baev@iaph.bas-net.by

Контроль сцепления неразъемных соединений металлов и неметаллов является актуальной задачей современного промышленного производства. Для этого может быть использован широкий набор традиционных методик и средств ультразвукового (УЗ) контроля, основанных на зондировании объекта акустическими волнами с последующим анализом амплитудных, фазовых, спектральных, частотно-фазовых характеристик сигнала-отклика [1]. Однако реализация этих методов на практике не всегда возможна из-за невысокой чувствительности и надежности измерений, обусловленных состоянием поверхности объекта, акустическими свойствами контактирующих материалов, условиями контроля. В настоящей работе представлены результаты исследований и разработки новых высокочувствительных и надежных методов и средств УЗ контроля сцепления материалов и их толщины.

1. Метод оптимизации апертур и фаз мнимых когерентных источников УЗ волн, рассеянных неоднородной границей для контроля сцепления материалов

Идея метода предложена в работе [2] и получила развитие в работе [3]. Предлагается существенно повысить чувствительность и надежность контроля за счет выбора таких условий прозвучивания объекта, включая угол падения волны β на контролируемую границу и угол ее приема β' , размеры апертуры ПЭП S_0 , частоту волны ν и длительность импульса τ , а также расположение ПЭП, при которых: а) фазовый сдвиг между отраженной УЗ волной от дефектной и бездефектной границ φ_0 максимален; б) основные измерения производятся при одновременном падении УЗ волн на дефектную S_D и бездефектную S_N поверхность контакта материалов. В общем случае поле рассеяния УЗ волн от m участков граничной поверхности в точке наблюдения M представляет собой суперпозицию полей мнимых когерентных источников (МКИ) волн, отраженных от i -го участка площадью S_i с коэффициентом отражения \mathfrak{R}_i и фазой волны φ_i : $A^*(M) = \sum_{i=1}^m S_i \mathfrak{R}_i F_i f(t) \exp(-j\varphi_i)$, где F_i – интегральные функции, характеризующие направленность поля МКИ, а $f(t)$ – временная функция зондирующего сигнала. Проведено экспериментальное исследование и расчет полей рассеяния объемных и поверхностных волн при дискретном и линейном изменении амплитудных и фазовых параметров отраженной от границы материалов волны при различных схемах прозвучивания. Обращено внимание на возможность достижения максимальной чувствительности метода даже при величине фазового сдвига между отраженными от дефектной и бездефектной границы модами $\varphi_0 - \pi/2$ и меньше. Это достигается: а) использованием асимметричных схем прозвучивания с помощью двух [2] или одного ПЭП; б) приемом отраженного сигнала под углом $\beta' \rightarrow \theta_1$, соответствующим первому минимуму основного лепестка раскрытия поля рассеяния МКИ $A(\theta)$ (рис. 1). Результаты эксперимента и теоретического моделирования на основе использования волн Рэлея (рис. 1), находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с опытными данными. Как установлено, поле рассеяния акустического пучка, перемещаемого вдоль отражающей неоднородной границы, сопровождается существенным изменением амплитуды сигнала (до -40 дБ), что достигается при фиксированном угле приема ПЭП $\beta' = 7^\circ$, в окрестности которого величина $|\partial A / \partial \beta'|$ максимальная. Учитывая волновую природу исследуемого процесса, этот метод может быть использован для УЗ контроля объектов объемными, пластинчатыми и др. упругими модами и является основой решения важной научно-технической задачи – обнаружения потенциально опасных дефектов со слабой отражающей способностью, включая дефекты слипания (kiss-bond) в металлических и неметаллических соединениях [4].

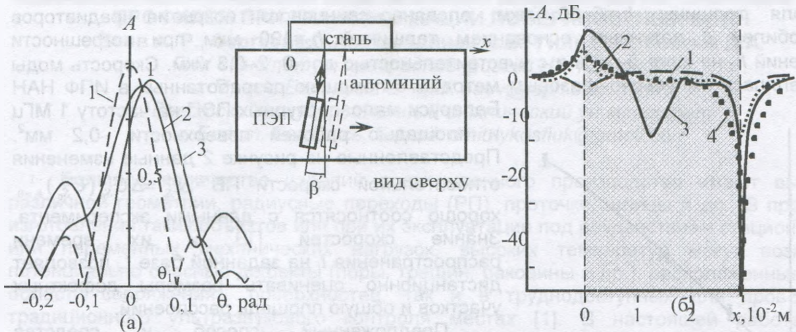


Рисунок 1 – Расчетные (а) и опытные (б) данные поля рассеяния ПАВ на неоднородной границе: а) угловая характеристика двумерного поля рассеяния при $\gamma=d/2a=0$ (1); 0,3 (2); 0,5 (3); где d – ширина дефекта, а $2a$ – пятна акустического луча на границе сред; б) амплитуда ПАВ от координаты пересечения акустического луча с осью x при угле приема $\beta=0(1); 5^\circ(2.); 7^\circ(3, 4);$ эксперимент (1–3); расчет (4); фазовый сдвиг $\varphi_D=0,45\pi$.

Предложен метод оценки площади дефекта S_D , когда $\varphi_D \rightarrow \pi$. Метод реализуется путем направленного варьирования площади S_A падающего на границу сред акустического пучка до такой величины, при которой $A \rightarrow 0$, а S_D оценивают из формулы: $S_D = K(S_A) S_A \Re_N(\Re_D)^{-1}$, где $K(S_A)$ – корректирующий интегральный коэффициент, зависящий от условий контроля. Отметим, величина фазового сдвига отраженной волны φ является наиболее значимым информативным параметром, характеризующим состояния границы сред, и слежение за ним по данным амплитудно-угловых параметров поля рассеянной волны позволяет оперативно контролировать качество сцепления покрытий, а также пятно контакта сопрягающихся поверхностей, выявлять подповерхностные дефекты в объектах с грубообработанной поверхностью (литье, чугуны и др.), выбирая при этом длину зондирующей волны λ максимально возможной величины.

2. Пластинчатые волны (ПВ) для контроля тонкостенных слоистых объектов

2.1. Двухслойные пластины

В ряде важных случаев контроль толщины и сцепления защитных покрытий тонкостенных изделий традиционными методами осложняется при одностороннем доступе к объекту (радиаторы автомобилей, корпуса летательных аппаратов и др.). В особенности это важно, когда толщина защитного слоя h_1 может изменяться от нескольких мкм до десятков мкм, а удельные акустические сопротивления контактирующих сред близки друг к другу. Предложен оперативный метод толщинометрии подобного рода защитных покрытий и оценки площади расслоения с основой путем использования самой быстрой пластинчатой s_0 моды. Дано теоретическое обоснование упрощенной модели ее распространения в двухслойной пластине. Используя правило смещения, получено выражение, связывающее искомое значение скорости C'_{s_0} , модули Юнга E_i , коэффициенты Пуассона κ_i , толщину h_i и плотность ρ_i защитного покрытия ($i=1$) и основы (2):

$$C'_{s_0} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{\kappa'}{2}\right)} = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1} \frac{1}{[1+h'_1(E_{11}-1)][1+h'_1(\rho_{11}-1)]} \left\{ 1 + \frac{(\kappa_1 h'_1)^2}{2} \left[1 + 2 \frac{\kappa_1 h_1^2}{\kappa_2 h_2} + \left(\frac{\kappa_1 h'_1}{\kappa_2 h'_1} \right)^2 \right] \right\}}$$

где $E_{21}=E_2/E_1$, $\rho_{12}=\rho_1/\rho_2$, $h'_1=h_1/h$, $h=h_1+h_2$.

Проведена экспериментальная проверка предложенного метода на примере контроля толщины $h_1=5-50$ мкм оловянно-свинцового покрытия радиаторов автомобилей с латунным основанием толщиной $h_2=190$ мкм при погрешности измерений h_1 не хуже 5–10% и с чувствительностью до $-0,2-0,3$ мкм. Скорость моды определялась импульсно-фазовым методом с помощью разработанных в ИПФ НАН

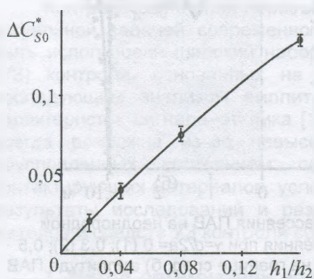


Рисунок 2 – Влияние толщины покрытия на скорость пластинчатой моды: теория (—) и эксперимент (o)

Беларуси малоапертурных ПЭП на частоту 1 МГц и площадь рабочей поверхности $-0,2$ мм². Представленные на рисунке 2 данные изменения относительной скорости ПВ $\Delta C'_{S_0} = \Delta C'_{S_0} (C'_{S_0})^{-1}_{h_1=0}$ хорошо соотносятся с данными эксперимента. Знание скоростей ПВ и их времени распространения t_i на заданной базе L_i позволяет дистанционно оценивать размеры дефектных участков и общую площадь расслоений.

Предложенный способ и средства возбуждения–приема пластинчатых мод апробированы и на образцах металл–полимер, в качестве которых взяты пластины фольгированного гетенакса толщиной $h_1 \approx 160$ мкм. Установлена возможность толщинометрии подобных материалов. Как установлено, уменьшение толщины медного покрытия от нуля до 8 мкм сопровождается квазилинейным

уменьшением скорости ПВ и ростом временной задержки Δt для зондирующего импульса, а уменьшение толщины подложки (до 60 мкм) – наоборот. Чувствительность метода, определяемая усредненным параметром $\Delta t/\Delta h$, практически в 2 раза выше к изменению толщины медного покрытия, чем полимерной основы.

2.2. Контроль площади S_D расслоения биметаллического соединения с термостойким покрытием летательных аппаратов

Использование несимметричных пластинчатых волн для определения S_D осложнено шумовым фоном сопутствующих мод, возникающих в каждой слое оболочки контролируемого объекта, представляющем собой своеобразный волновод. Предложен метод, нивелирующий этот паразитный эффект, заключающийся в частотном «рассогласовании» измерительного теневого тракта путем варьирования опорной частоты сигнала источника волн до некоторого оптимального значения ν_0 . Разработана методика и оборудование, позволяющие впервые выявлять потенциально опасные дефекты сцепления стенки биметаллической оболочки с термостойким покрытием и площадью не хуже 50 мм².

Список литературы:

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т./ По д общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 3. – М.: Машиностроение, 2003. –864 с.
2. Баев А.Р. Способ ультразвукового контроля качества склеивания материалов. Патент РБ на изобретение № 15036 от 08.06.09 зарег. 19.07.11, –2011г.
3. Baev, A.R. and Asadchaya, M.V., Features of Reflection of an Acoustic Beam from a Surface with Nonuniform Boundary conditions., ISSN 1061_8309, Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, No. 8. – pp. 547–558. © Pleiades Publishing, Ltd., 2010.
4. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser–ultrasound. – Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden, Colorado, 22–27 July 2007. – V. 27A. – pp. 279–285.