

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Баев А. Р.<sup>1</sup>, Гуделев В.Г.<sup>2</sup>, Митьковец А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,

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

<sup>2</sup>ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,

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

Неразрушающий контроль объектов ряда отраслей современного промышленного производства, имеющих сложный профиль, высокую температуру (до 1000°C), расположенных в труднодоступных местах является весьма актуальной задачей. Для этих целей все более широкое применение находят методы и средства импульсно-лазерного (ИЛ) контроля [1], позволяющие дистанционно “зондировать” металлоизделия на наличие объемных и поверхностных дефектов, возбуждая объемные, пластинчатые и поверхностные волны (ПАВ). В настоящей работе обращено внимание на ряд методических особенностей ИЛ-контроля и возможностей повышения эффективности последнего применительно к выявлению поверхностных и объемных несплошностей или дефектов (трещин, пор, инородных включений) а также – толщинометрии тонкостенных изделий. На первом этапе исследований изучаются особенности выявления поверхностных дефектов движущимся пятном лазерного луча (ПЛЛ), а на втором – возможности моделирования оптоакустического тракта применительно к возбуждению и приему продольных, поперечных и поверхностных волн с использованием жидких сред. Последние играют функцию элемента преобразования оптического излучения в УЗК.

Необходимо выделить два основных направления ИЛ-контроля поверхностных дефектов, причём первое из них является традиционным и подобно, преимущественно, тому, что реализуется в ультразвуковой дефектоскопии [2], т.е. о наличии несплошности судят по амплитуде волны, отраженной от дефекта или прошедшей через него. При этом поверхность ПЛЛ ( $S_{ПЛЛ}$ ) и приемника ПАВ находятся вне дефекта. Во втором же случае о наличии дефекта судят по данным изменения параметров зондирующего сигнала при пересечении ПЛЛ дефектной области  $S_D$ . В этом случае нарушаются граничные условия для тензора напряжений  $T_{ik}$  и теплового потока  $q$  в области  $X \in S_{ПЛЛ}$ , и следует ожидать значимого изменения амплитудно-частотных характеристик  $P(\omega)$  возбуждаемых ПАВ. Проанализированы возможные схемы возбуждения ПАВ, когда ПЛЛ имеет форму: а) длинной полосы (полос); б) сектора (секторов) с заданным радиусом кривизны  $R$  и толщиной  $d$ ; в) колец; г) круглого пятна. Обращено внимание на то, что эффективность ИЛ-контроля может быть существенно повышена путем управления формой ПЛЛ с помощью механических или электронных устройств. При этом представляется возможным изменять направленность ПАВ путем: углового качания или вращения фронта ПАВ (схема а и б); фокусировать и изменять фокусное расстояние  $F=R$  (схема б и в), а также формировать поля ПАВ и других конфигураций. Эффективность излучения-приема зондирующего сигнала может быть повышена путем формирования ПЛЛ в виде нескольких полос (схемы а-в), отстоящих друг от друга на расстоянии  $\lambda_R/2$ , где  $\lambda_R$  – длина волны ПАВ.

При проведении экспериментальных исследований в качестве источника ИЛ-излучения служит генератор ЛТИПЧ с устройством коррекции сечения светового пучка, падающего на исследуемый образец. Прием и обработка электрического сигнала, снимаемого с приемного преобразователя, производится с помощью “Spectronic” TDS 3052B. ПЛЛ имеет форму круглого пятна либо вытянутой полосы с поперечным сечением  $d = 0.2-5$  мм. При проведении исследований в качестве базового объекта взяты образцы с трещинами: №1 – длина трещины  $b \approx 20$  мм, ширина ее устья  $d = 4$  мкм, глубина  $h = 400-$

450 мкм; образец №2 –  $b \approx 3$  мм,  $h \sim 200-300$  мкм,  $d \approx 0,5$  мкм. Поверхностная пора моделируется путем сверления стальных образцов на разную глубину.

Необходимо отметить, что независимо от типа дефекта (поры или трещины), при последовательном перемещении ПЛЛ через область с дефектом наблюдается существенное изменение: А) амплитуды ПАВ: Б) спектра или формы “вступительной” части импульса, занимающей временной интервал его осцилляции  $\tau = (2-3)f^{-1}$ , где  $f$  – характерная частота волны; В) индикатрисы рассеяния  $\Phi(\beta)$ . Если несплошность – трещина, то заметно появление “сателлитов” ПАВ, возникающих, по-видимому, в результате отражения от стенок трещины обратной волны, генерируемой ПЛЛ. Как видно из рисунка 1, зависимость амплитуды волны  $P(x)$  имеет ярко выраженный максимум, достигаемый, преимущественно, при расположении центра ПЛЛ в окрестности характерного значения  $x_m \subset \{S_D, S_{ПЛЛ}\}$ . Максимальное же увеличение амплитуды сигнала, характеризуемое амплитудным коэффициентом  $\epsilon_A = P_{max} / P_x$ , может достигать 7–8 раз и более, если безразмерный поперечный размер ПЛЛ  $d^* = d / \lambda_{ПАВ}$  выбран оптимальной величины, где  $P_x$  соответствует минимуму амплитуды сигнала при положении центра ПЛЛ по обе стороны от центра дефекта. Необходимо отметить, что амплитудные изменения ПАВ при перемещении ПЛЛ через трещину с предельным раскрытием (шириной ~0,5 мкм) и длиной ~3 мм составили всего 25–40%. При этом наиболее достоверным признаком, характеризующим наличие дефекта, может служить форма “вступительной” части осцилляции импульса, обусловленная сложным характером формирования поля ПАВ в окрестности трещины. (Ранее в работе [1] при изучении подобного эффекта на образце с длиной искусственной трещины шириной  $\delta = 50$  мкм влияние параметра  $d^*$  на амплитуду возбуждаемой ПАВ не изучалось, а зафиксированное “усиление” амплитуды ПАВ составило всего  $\epsilon_A \sim 2$ ).

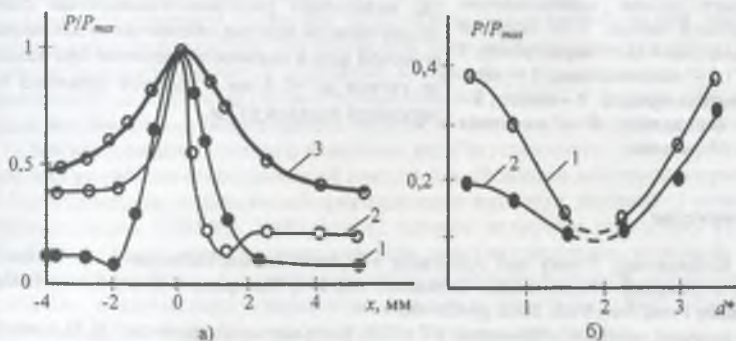


Рис. 3. Амплитуда ПАВ в зависимости от положения ПЛЛ типа длинной полосы относительно трещины (а) и от безразмерной ширины ПЛЛ (б): (а) –  $d^* = 2,2$  (1);  $0,2$  (2);  $5$  (3); (б) –  $P_A = P_A(x)$ , где  $x_1 = -4$  мм (1) и  $x_2 = 4$  мм (2)

Весьма интересным с точки зрения механизма ОА-взаимодействия и важным для практики является тот факт, что при отношении площади ПЛЛ к площади несплошности (модельной поры)  $S^* = S_{ПЛЛ} / S_{ПН} = 25$  величина  $\epsilon_A$  достигает ~5–6. При этом так называемый “захват” контролируемой поверхности объекта при ОА-сканировании, определяющий производительность контроля (при сохранении высокой чувствительности), может быть весьма большим. Прием же ПАВ может производиться ненаправленным приемником колебаний, включая интерферометр, ультразвуковой или ЭМА-преобразователь. Ис-

следованные зависимости  $P(x)$  и  $\epsilon_A(d^*)$  для случая, когда ПЛЛ имеет форму круга, а неплотность – цилиндрическое углубление диаметром 1 мм ( $h = 0-2,1$  мм), хотя и подобны полученным выше, но и имеют ряд отличий, обусловленных, прежде всего, индикатрисой рассеяния  $\Phi(\varphi)$ .

Изучены возможности моделирования оптоакустического тракта применительно к возбуждению и приему в металлах объемных волн и ПАВ с использованием локальных иммерсионных ванн, удерживаемых магнитами. Как показано экспериментально, с помощью последних представляется возможным возбуждать в твердых телах фронт продольных волн при интенсивностях  $J_l$  на порядок больше тех, что используются на практике. Если же в качестве контактной жидкой среды используется магнитная жидкость (МЖ) [3], помещенная между образцом и световодом, наклоненным под углом  $\beta$ , то в образце будут

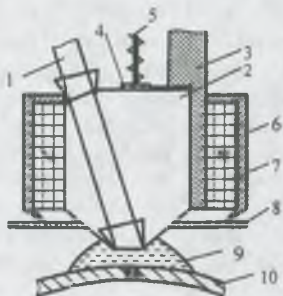


Рис. 3. Схема толщинометрии изделий из жаропрочного сплава использованием ИЛ-контактного метода: 1 – лазерный луч, 2 – кварцевый светозвукопровод, 3 – корпус, 4 – пьезопластина; 5 – электрод, 6 – магнитопровод, 7 – магнит; 8 – защитное ограждение; 9 – магнитная жидкость; 10 – стенка

возбуждаться продольные и поперечные волны под углом  $\alpha = \arcsin[\sin\beta(C_{МЖ}/C_{L,T})]$ , а также поверхностные, головные, пластинчатые и другие типы волн, где  $C_{L,T}$  – скорость продольной ( $L$ ) или поперечной ( $T$ ) волны в образце, а  $C_{МЖ}$  – в магнитной жидкости. При этом существенно уменьшается шумовой фон, имеющий место при прямом воздействии лазерного излучения на объект, и достигается высокая чувствительность и разрешающая способность контроля. Схема ИЛ-контактного метода толщинометрии тонкостенных изделий сложного рельефа, где в качестве контактной среды используется МЖ, поясняется на рисунке 3. В этом случае реализуется так называемая раздельно-совмещенная схема прозвучивания изделия, обеспечивающая низкий шумовой фон и высокое разрешение при толщине стенки до  $\sim 0,3$  мм и радиусе кривизны поверхности изделия  $\pm 1$  см.

### Список литературы

1. Sridhar Krishnaswamy Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20A, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E., Eds., Plenum Press, New York, 2003, pp.436-492.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т.3: Ультразвуковой контроль. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
3. Baev A.R., Karabutov A.A., Gudelev V.G., Mitskovets A.I., Asadchaya M.V Peculiarities of ultrasound excitation in magnetic fluids by laser pulses. – Proceedings of the International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences», B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk, June 15-19, 2010. – P.89-94.