



Possibilities of use of optoacoustic contact method for control of metalware are analysed and results of experimental surveys on identification of superficial cracks of micron opening by moving beam of pulse and laser emission are presented.

*А. Р. БАЕВ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
В. Г. ГУДЕЛЕВ, А. И. МИТЬКОВЕЦ, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,
М. В. АСАДЧАЯ, Институт прикладной физики НАН Беларуси*

УДК 543.424+621.179

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Введение

Одна из тенденций современных методов неразрушающего контроля (НК) продукции промышленного производства связана с необходимостью повышения его производительности и надежности. В особенности это касается контроля металлоизделий машиностроительной, авиационной промышленности, имеющих сложный профиль, высокую температуру (до 1000 °С), расположенных в труднодоступных местах. Для этих целей все более широкое применение находят методы и средства импульсно-лазерного контроля [1], позволяющие дистанционно «зондировать» металлоизделия на наличие объемных и поверхностных дефектов, возбуждая объемные, пластинчатые и поверхностные волны (ПАВ). Несмотря на большое число работ, посвященных этой тематике, вопросы массового внедрения импульсно-лазерной техники НК наталкиваются на ряд проблем, связанных с дороговизной и недостаточной проработкой вопросов адаптации систем бесконтактного приема зондирующего сигнала к условиям промышленного производства. В настоящее время в силу сложившейся ситуации и потребностей развития ряда прикладных направлений находят применение оптоакустические (ОА) контактные методы импульсно-ультразвукового контроля и измерений, основанные на использовании в качестве источника упругих волн (УВ) оптического квантового генератора, а приемником служат преимущественно контактные пьезострикционные преобразователи и в меньшей степени – магнитоакустические, емкостные и другие преобразователи [2, 3]. Это направление имеет свои особенности и позволяет повысить чувствительность и надежность НК по сравнению с традиционными методами, а так-

же расширить сферу его применения и возможностей измерения свойств и степени дефектности материалов. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований и методических разработок, представляющих интерес для НК металлоизделий на базе использования бесконтактного ОА-возбуждения в них упругих волн и приема контактными преобразователями.

Выявление поверхностных несплошностей движущимся лазерным лучом

Как известно, для НК потенциально опасных поверхностных дефектов, включая усталостные дефекты, поры и др., а также структуроскопии и толщинометрии металлоизделий используются традиционные методы, включая визуальный, токовихревой, магнитографический, капиллярный, и как наиболее распространенный – акустический контроль, основанный на анализе амплитудных, фазочастотных и временных параметров акустического сигнала, зондирующего объем и поверхность исследуемого объекта. Ввиду повышенных требований к производительности и чувствительности НК объектов со сложным рельефом, ориентацией в пространстве, расположенных в труднодоступных местах, применение указанных методов имеет ограничение. Нами рассмотрены возможность и эффективность выявления указанных дефектов по изменению параметров ПАВ, возбуждаемых на объекте движущимся пятном лазерного луча (ПЛЛ) при непосредственном пересечении им поверхностной несплошности. Именно в этом случае нарушаются граничные условия формирования возбуждаемых ПАВ и следует ожидать значимого изменения их амплитудно-частотных характеристик $A(\omega)$.

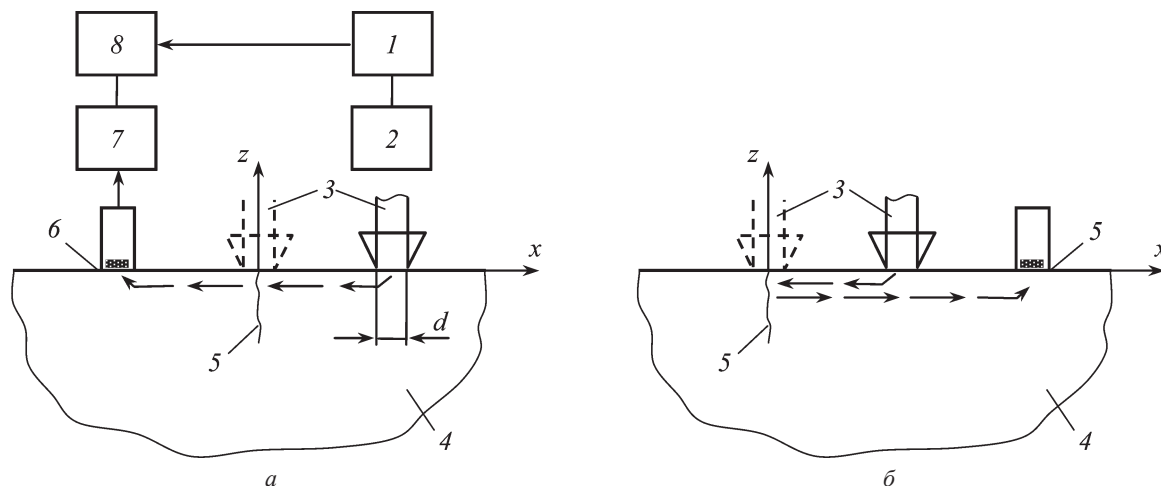


Рис. 1. Схема эксперимента влияния положения ПЛЛЛ относительно трещины на амплитуду ПАВ: а – режим прохождения; б – эхо-режим; 1 – лазер; 2 – устройство коррекции луча; 3 – ПЛЛЛ; 4 – объект; 5 – трещина; 6 – приемник ПАВ; 7 – усилитель; 8 – блок обработки

Экспериментальная схема и методика исследований

Пояснение к работе экспериментальной установки и методики исследований приведено на рис. 1, где в качестве источника импульсного лазерного излучения 1 использован генератор ЛТИПЧ с устройством коррекции сечения светового пучка 2, падающего на исследуемый образец. Прием ПАВ, распространяющихся вдоль направления x , производится пьезоэлектрическим наклонным преобразователем (ПЭП), сигнал с которого поступает после усиления на вход «Spectronic» TDS 3052В для обработки и анализа амплитуды и спектра. Длина волны источника лазерного излучения 1,06 мкм. Имитация движения лазерного луча относительно трещины осуществляется путем непрерывного перемещения образца с трещиной и установленным неподвижно приемным ПЭП по направлению к оси лазерного луча с первоначальной координатой $x > 0$. Причем шаг относительного перемещения ПЛЛЛ в окрестности трещины составлял $\sim 0,05$ мм. Частота следования импульсов, возбуждающих ПАВ, $f = \omega/2\pi = 10$ Гц, а форма ПЛЛЛ подобна вытянутой полосе с изменяемым поперечным сечением в пределах $d = 0,2-5,0$ мм. В качестве базового объекта исследований взяты образцы с трещинами: № 1 – длина трещины $b \approx 20$ мм, ширина ее устья $d = 8$ мкм, глубина $h = 400-450$ мкм; образец № 2 – $b \approx 3$ мм, $h \sim 200-300$ мкм, $d \approx 0,5$ мкм. Режим возбуждения ПАВ термоупругий, так как при его реализации $\sim 70\%$ энергии поглощенного лазерного излучения трансформируется в поверхностную волну [2].

Результаты экспериментальных исследований

Некоторые данные экспериментальных исследований приведены на рис. 2. Как видно из рисунка,

зависимость амплитуды волны $A(x)$ на приемном ПЭП имеет ярко выраженный максимум, достигаемый при расположении центра ПЛЛЛ в виде длинной полосы в окрестности трещины ($x \approx 0$). При этом амплитуда сигнала при смещении ПЛЛЛ в диапазоне $-4 \text{ мм} \leq x \leq 4 \text{ мм}$ может возрасти не в 2 раза (как предполагалось ранее), а в 7–8 раз. Если же ПЛЛЛ имеет форму круглого пятна ($d = 3$ мм), то амплитуда может увеличиться не более чем в 3–4 раза. Указанный эффект проявляется как в теневом режиме прозвучивания объекта, так и в эхо-режиме. Также установлено, что оптимальные условия выявления поверхностных трещин достигаются при отношении ширины пятна лазерного луча к длине волны ПАВ $d^* = 1,8-2,2$, что характерно для реализации условий проявления системой «резонансного режима». Отметим, что амплитудные изменения сигнала на приемном ПЭП при зондировании трещины с малым (предельным) раскрытием ($\sim 0,5$ мкм) и длиной ~ 3 мм составляли не более 2–3 дБ. Однако при этом признаком, характеризующим наличие дефекта, может служить форма «вступительной» части осцилляции импульса, обусловленная сложным характером формирования поля ПАВ в окрестности трещины.

Необходимо отметить, что аналитическое решение рассматриваемой задачи даже в частном случае весьма затруднительно [3] и зависит от комплекса параметров, включая теплофизические и упругие свойства материала образца, соотношение между геометрическими размерами трещины $l_i = \{b, h, \delta\}$, спектральную функцию возбуждаемых лазерным лучом колебаний $F_L(\omega)$ и функцию приема $F_R(\omega)$, а также (что очень важно) от коэффициента прохождения или преобразования энергии волны на трещине $K(\omega, l/d, l_i/\lambda \dots)$, являющегося весьма сложной функцией не только от ука-

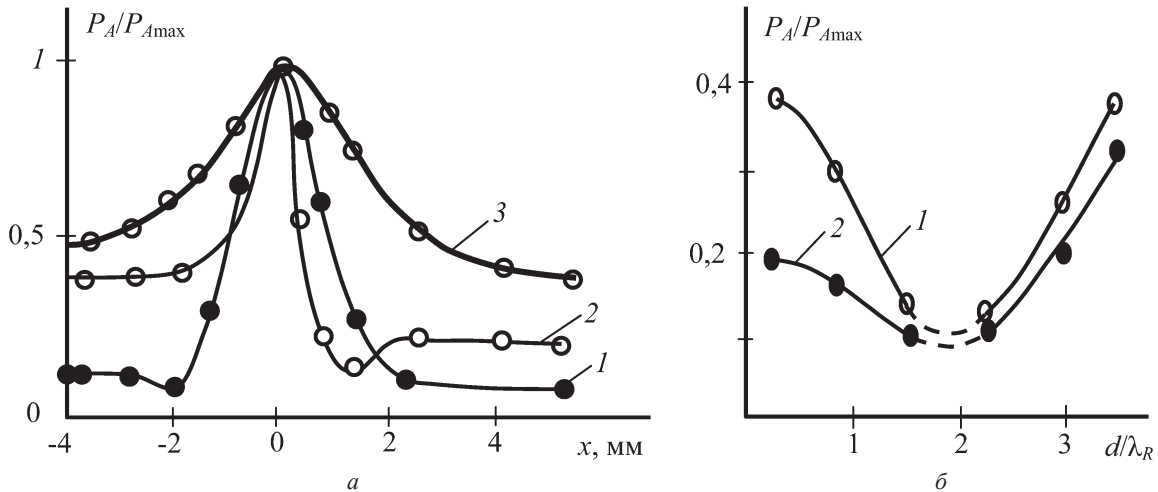


Рис. 2. Нормализованная амплитуда ПАВ на приемном преобразователе при изменении координаты центральной оси x пятна лазерного луча (ПЛЛ) типа длинной полосы по отношению к трещине (а): 1 – $d^* = df/C_R = 2,2$; 2 – 0,2; 3 – 5, где d – максимальная измеренная под микроскопом ширина пятна лазерного луча; f^* – частота преобразователя; изменение относительной амплитуды ПАВ P_A/P_{Amax} в зависимости от d^* (б), где $P_A = P_A(x)$, $x_1 = -4$ мм (1) и $x_2 = 4$ мм (2)

занных параметров, но и от степени контакта (или сжатия) стенок трещины. По-видимому, для рассматриваемых условий измерений основная причина наблюдаемого изменения параметров зондирующего сигнала заключается в следующем. Во-первых, при пересечении трещины пятном лазерного луча теплообмен и передача упругих возмущений между ее стенками затруднены, так как $\sigma_{ik} \rightarrow 0$ и $q_n \rightarrow 0$, где σ_{ik} – тензор напряжений, а q_n – тепловой поток, направленный нормально к стенке трещины. Так что можно считать, что в формировании ПАВ участвуют два источника с изменяемыми характерными поперечными размерами: d_1 и d_2 , где $d_1 + d_2 = d$. Если учесть, что на бездефектной поверхности всего лишь 50% энергии ПАВ распространяется по направлению к ПЭП, то при локализации лазерного пятна в окрестности трещины ($d_1 \leq x \leq 0$) произойдет повышение плотности энергии ПАВ, направленной к приемному ПЭП, вследствие отражающих свойств трещины. При этом максимальное усиление амплитуды может быть ~ 6 дБ. При достаточно же большой ширине источника ($d > \lambda$) возможно даже гашение зондирующего сигнала вследствие эффектов интерференции, так как, согласно [4], $A \sim \frac{\sin k_R d}{k_R} e^{ik_R x}$, где $k_R = 2\pi/\lambda$. С этих позиций и можно качественно объяснить ход амплитудных зависимостей, приведенных на рис. 2.

Проведенные исследования также показали, что путем уменьшения поперечного сечения ПЛЛ представляется возможным достаточно легко обнаруживать дефекты протяженностью $b < \lambda$ (менее 0,5 мм), слабо выявляемые традиционными ультразвуковыми методиками [2]. При этом в процес-

се сканирования в силу слабой направленности возбуждаемого сигнала (ПЛЛ – круглое пятно) прием его производится также ненаправленным приемником (контактным или бесконтактным), установленным стационарно. Важно также отметить, что наличие мелких рисок, царапин, а также «умеренное, плавно изменяющееся по поверхности загрязнение» поверхности не оказывает существенного влияния на чувствительность измерительной процедуры, что весьма важно для реализации дистанционного контроля и диагностики состояния ответственных деталей узлов и соединений.

Толщинометрия тонкостенных полых изделий

Значительные проблемы для применения традиционных методов НК представляет контроль полых металлоизделий с тонкими стенками и толщиной защитных покрытий, достигающей десятков мкм. Ниже рассмотрены некоторые методические аспекты применения импульсно-лазерной техники для этой цели. В качестве объекта исследований выбраны радиаторы автомобилей (рис. 3, а) и полые авиационные литые лопатки из жаропрочного сплава (рис. 3, б). Рис. 3, б поясняет предложенный способ толщинометрии, реализованный в конструкции комбинированного отдельно-совмещенного высокочастотного преобразователя. Отметим, что контроль стенок литых лопаток толщиной вплоть до $h = 0,2-0,3$ мм и радиусом кривизны до $r = \pm 1$ см с погрешностью не хуже 8–10% весьма затруднителен традиционными методами из-за значительного шумового фона, возникающего при возбуждении и приеме зондирующей продольной волны [3]. В предложенной схеме оптоакустического контактного преобразователя (ОАП)

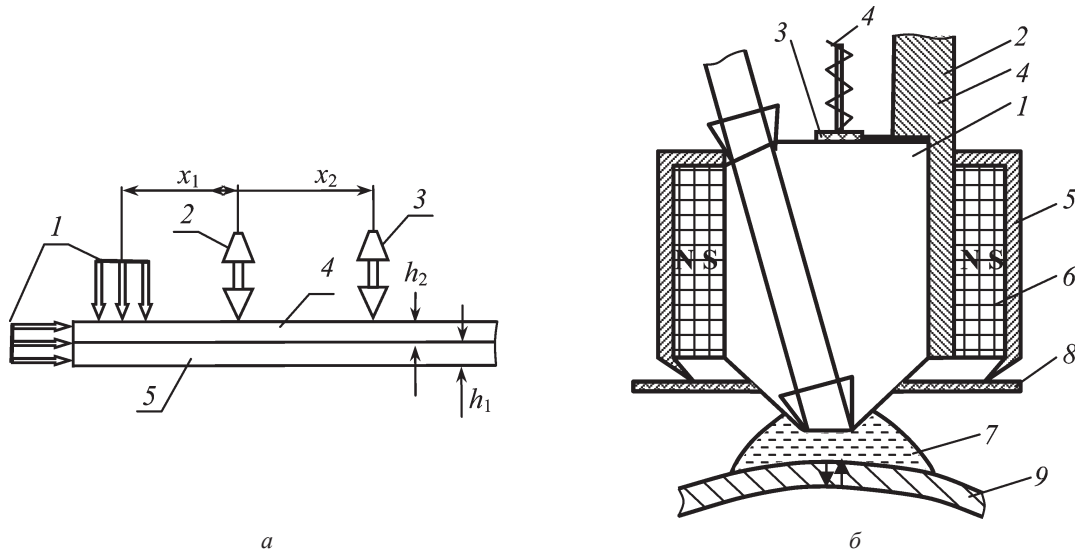


Рис. 3. Схема толщинометрии двухслойных материалов (а) и комбинированный раздельно-совмещенный ПЭП для контроля толщины стенки полых литых лопаток из жаропрочного сплава с применением оптоакустического способа возбуждения упругих волн (б): а – 1 – лазерный луч; 2 и 3 – малоапертурные приемники волн Лэмба; 4 – защитное покрытие; 5 – латунная основа стенки; б – 1 – кварцевый световод; 2 – корпус; 3 – пьезопластина; 4 – электрод; 5 – магнитопровод; 6 – магнит; 7 – магнитная жидкость; 8 – защитное ограждение; 9 – стенка лопатки

зондирующая продольная волна возбуждается источником импульсно-лазерного излучения, падающего на границу звукопровод-контактная жидкость-объект. Один из возбуждаемых акустических импульсов отражается по направлению пьезопластины ПЭП, а второй – передается в материал лопатки, отражается от ее внутренней стенки и поступает на приемную пьезопластину. Эти два информативных акустических импульса поступают на регистрирующее устройство, выполняющее функцию измерителя временного интервала τ между указанными импульсами, так что толщина стенки определяется по формуле $h = C\tau/2$. Применение новшества позволяет за счет локализации площади ввода продольной волны в исследуемый объект ($\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) и малой длительности зондирующего сигнала ($\sim 20 \text{ нс}$) снизить погрешность измерений

толщины стенки лопатки до $0,015 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Применение же магнитной жидкости [5] в качестве акустической контактной среды, удерживаемой полем магнитов, позволяет существенно повысить коэффициент ОА-преобразования (более 20 дБ) и стабильность ввода-приема упругих колебаний.

Рис. 4, а и 4, б иллюстрируют высокую чувствительность и надежность предложенной методики измерения волнами Лэмба толщины металлических покрытий, расположенных на металлической и полимерной основе стенки. Как показали исследования, наиболее эффективным режимом ОА-возбуждения самой быстрой из пластинчатых волн (s_0 -моды) является термоупругий. Из приведенных на рис. 3, а вариантов места локализации ПЛЛ наиболее предпочтительным с точки зрения согласования спектра приемных малоапертурных

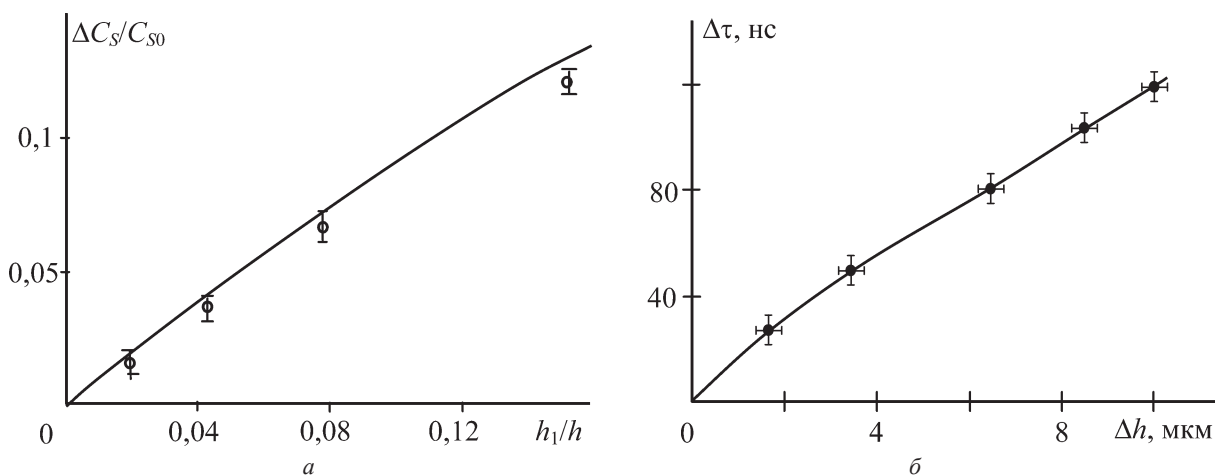


Рис. 4. Влияние толщины защитного слоя стенки радиатора на изменение скорости волны Лэмба (а) и изменение времени распространения волны Лэмба $\Delta\tau$ (б) с уменьшением толщины фольги на гетинаксе; акустическая база 43 мм

преобразователей и источника колебаний является базовая поверхность объекта. Согласование излучающего ПАВ источника и их приемников достигается путем оптимизации пространственно-временной функции интенсивности лазерного излучения $J(t, x)$. Причем форма ПЛЛ подобна длинной полосе, ширину которой выбирают равной $d = \kappa \lambda_L$, где выбор κ зависит от распределения светового потока в области лазерного пятна, а λ_L – соответствует длине волны s_0 -моды, распространяющейся в основе стенки изделия.

На рис. 4, а показаны сравнительные данные расчетной теоретической модели с опытными данными.

В основу расчетов положена обоснованная упрощенная модель распространения быстрой пластинчатой моды, предложенная нами ранее в работе [6], где тонкая двухслойная стенка рассматривается как волновод с характерными эффективными (усредненными) упругими константами и плотностью, определяемыми согласно аддитивному правилу или правилу смешения, т. е. модуль Юнга E , плотность ρ и коэффициент Пуассона \mathfrak{N} упомянутого волновода связаны следующими соотношениями:

$$E^{-1} = E_1^{-1} h_1' + E_2^{-1} h_2', \mathfrak{N} = \mathfrak{N}_1 h_1' + \mathfrak{N}_2 h_2', \rho = \rho_1 h_1' + \rho_2 h_2',$$

где $h_1' = h_1/h$; $h_2' = h_2/h$, $h = h_1 + h_2$.

В результате решения обратной задачи получено выражение для $\Delta C_S/C_{S0}$ как функция от $h_1' = h_1/h$, где $\Delta C_S = C_{S0} - C_S$.

Как следует из полученных данных, с помощью предложенного метода (и введения дополнительного корреляционного коэффициента) представляется возможным измерять тонкие покрытия из сплава ПОС 1 толщиной h_2 на латунном основании ($h_1 \approx 0,18-0,2$ мм) в пределах допустимой погрешности ($\sim 10-12\%$). Причем при $h_1 < 10$ мкм чувствительность измерительной схемы при расстоянии между приемными ПЭП $L = 43$ мм достигает $0,6-0,8$ мкм; увеличение акустической базы за счет увеличения расстояния между приемными ПЭП или использование режима отражения позволяет повысить точность измерений.

Приведенные на рис. 4, б данные эксперимента также свидетельствуют о высокой чувствительности ОА-метода при контроле толщины медной фольги на полимерной основе (гетинаксе). В частности, по данным времени распространения волны Лэмба можно фиксировать изменения толщины фольги $\sim 0,4-0,5$ мкм при известном значении толщины полимерной основы. Подобным образом представляется возможным контролировать и толщину основы.

Необходимо отметить, что для снижения погрешности измерений, вызванной дисперсией пластинчатой волны, распространяющейся по двухслойному волноводу, следует осуществлять «подстройку» пространственно-временной функции интенсивности лазерного излучения $J(t, x)$.

Выводы

Рассмотренные примеры применения оптоакустического метода контроля металлоизделий, сочетающего бесконтактное ОА-возбуждение поверхностных, продольных и пластинчатых волн и их прием контактными преобразователями, указывают на перспективность использования метода на промышленных предприятиях.

В частности, представляет интерес решение задачи по выявлению поверхностных несплошностей, включая трещины микронного размера, поры с поперечными размерами, составляющим доли мм и др., на различных объектах, в том числе расположенных в труднодоступных местах (отверстиях, полостях) путем непрерывного перемещения ПЛЛ по поверхности объекта и выявления дефекта стационарным приемником по характерному изменению амплитуды или спектра сигнала.

На примере контроля толщины стенок полых литых лопаток из жаропрочной (немагнитной) стали с радиусом кривизны до $r = \pm 1$ см показана эффективность использования раздельно-совмещенного варианта преобразователя, в котором кварцевый звукопровод сочетает функцию светопровода импульсно-лазерного излучения: за счет локальности ПЛЛ и малой длительности импульса (~ 20 нс) представляется возможным определять толщину стенок полых лопатки до $0,2-0,3$ мм с погрешностью не хуже $8-10\%$.

Установлена возможность контроля ОА-методом толщины покрытия тонкостенных изделий волнами Лэмба и показана эффективность использования самой быстрой s_0 -моды для определения толщины фольги на полимерной основе и оловянно-свинцового покрытия с погрешностью не хуже $10-12\%$.

На основе результатов проведенных исследований сделан вывод о перспективности использования ОА-метода по следующим направлениям:

- Контроль параметров упрочнения металлоизделий ТВЧ-закалкой, цементацией, химико-термической обработкой, борированием по данным изменения спектра зондирующего сигнала (ПАВ). Возможность реализации этого способа и достижения большей надежности и чувствительности контроля (по сравнению с известными [3, 6]) обусловлена широкой полосой возбуждаемого лазер-

ным излучением акустического импульса, спектральная функция которого $A(\omega)$ вследствие дисперсии на фиксированной акустической базе является весьма чувствительной к распределению твердости по глубине упрочненного слоя и его высоте.

- Структуроскопия сред по данным скорости УЗК. Бесконтактное возбуждение мощного короткого акустического импульса позволит значительно нивелировать влияние акустического контакта и шумового фона на измерительную процедуру. В частности, это позволит усовершенствовать уже известную измерительную процедуру контроля структуры чугунов, реализуемую в настоящее время ультразвуковым контактным методом [7], и повысить производительность и надежность НК.

- Контроль сцепления (адгезии) материалов и определение площади дефектов S_D . Вследствие малой величины мертвой зоны ($l \sim \tau C/2$) и длины возбуждаемой волны существенно повышается надежность контроля изделий с малой толщиной защитного покрытия [3]. Дальнейшее повышение чувствительности метода ($\sim 10\text{--}20$ дБ и более) мо-

жет быть реализовано на базе разработанного нами способа оптимизации апертур и фаз мнимых когерентных источников упругих волн, отраженных одновременно от дефектной и бездефектной границ сред [9, 10]. Как следует из результатов исследований, площадь дефекта S_D определяется путем периодического изменения апертуры источника волн, что легко достигается с помощью воздействия на поверхность объекта импульсно-лазерного излучения с переменной во времени площадью S_L пятна лазерного луча. При этом для характерного отношения $S_{LD}^* = S_L/S_D$ зависимость амплитуды отраженного сигнала от S_{LD}^* имеет ярко выраженный минимум, по которому и определяют значение S_D .

Результаты исследований и разработки оптоакустического контактного метода НК могут быть самостоятельно использованы в различных приложениях и в то же время служат для развития «чисто» бесконтактного контроля металлоизделий с использованием оптических приемников колебаний поверхности.

Литература

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. P. 436–492.
2. Неразрушающий контроль: справ.: в 7-ми т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004.
3. Гусев В. Э., Карabutov А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
4. Викторov И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
5. Baev A. R., Karabutov A. A., Guddelev 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». В. I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk, June 15–19, 2010. P. 89–94.
6. Баев А. Р., Асадчая, Майоров А. Л., Коновалов Г. Е. Ультразвуковой контроль покрытий тонкостенных изделий с помощью пластинчатых волн // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 187–190.
7. Баев А. Р., Майоров А. Л., Тищенко М. А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 3. С. 187–192.
8. Майоров А. Л., Коновалов Г. Е., Баев А. Р., Гиль Н. Н. Результаты использования индикаторов структуры типа ИЧ в условиях производства чугуна // Литье и металлургия. 2006. № 2. С. 102–105.
9. Баев А. Р., Асадчая М. В. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 3–32.
10. Баев А. Р., Гуделев В. Г., Асадчая М. В., Митьковец А. И., Костюк Д. А. Отражение ОА-сигнала от неоднородной границы // Материалы 50-го Междунар. науч. симпозиума «Актуальные проблемы прочности». г. Витебск, ИТА НАН Беларуси, 27 сентября – 1 октября 2010 г. Витебск, 2010. С. 19–21.