

УДК 620.179-534.1

Особенности обнаружения поверхностных дефектов с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн

Баев А.Р.¹, Митьковец А.И.², Костюк Д.А.³, Коновалов Г.Е.¹

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь

³Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

Поступила 15.06.2016

Принята к печати 15.11.2016

Использование импульсно-лазерного возбуждения поверхностных волн и приема их пьезоэлектрическими контактными преобразователями перспективно для обнаружения поверхностных дефектов. Цель данной работы состояла в выявлении оптимальных условий обнаружения реальных усталостных трещин микронных размеров и поверхностных пор при пересечении движущимся пятном лазерного луча дефектной области.

Объектом исследований служили металлические образцы с шириной раскрытия устья усталостных трещин от 8 до 0,5 мкм и глубиной от 400–500 мкм до приблизительно 200 мкм. Цилиндрическое отверстие диаметром 1 мм использовалось в качестве модели поры. Экспериментальная установка для исследований содержит источник импульсно-лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм и длительностью приблизительно 20 нс. На выходе лазера установлено устройство регулирования размеров пятна лазерного луча в виде длинной полосы и круга. Акустические сигналы, возбуждаемые в результате термического нагрева поверхности образца лазерным импульсом, принимались наклонным преобразователем с рабочей частотой 2,7 МГц. Далее сигнал для обработки поступал на осциллоскоп «Spectronic» TDS 3052B.

Изучены закономерности изменения амплитуды и формы импульсов акустических волн в зависимости от координаты положения и геометрии пятна лазерного луча. Установлено, что оптимальные условия выявления дефектов по амплитудному признаку имеют место при пересечении пятном лазерного луча как трещины, так и поры. В первом случае рост амплитуды сигнала составил 7–8 раз, что характерно для резонансного режима возбуждения волн. При этом отношение ширины пятна луча в виде длинной полосы к длине волны составило приблизительно 1,8–2,2 раза. Если же трещина имеет малое раскрытие (приблизительно 0,5 мкм), то наиболее информативным параметром является спектр акустического импульса или его форма – вступительная часть импульса.

Таким образом, результаты исследований позволяют предложить новые возможности повышения надежности и чувствительности выявления поверхностных дефектов путем оптимизации геометрических параметров движущегося лазерного луча.

Ключевые слова: импульсно-лазерное излучение, поверхностные волны, пьезопреобразователь, трещина, пора.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Митьковец А.И., Костюк Д.А., Коновалов Г.Е.
Особенности обнаружения поверхностных несплошностей с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

For citation:

Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Kononov G.E.
[Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 3, pp. 286–295 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation

Baev A.R.¹, Mitkovets A.I.², Kostiuk D.A.³, Konovalov G.E.¹

¹*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus*

²*Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk Belarus*

³*Brest State Technical University,
Moskovskaya str., 267, 224017, Brest, Belarus*

Received 15.06.2016

Accepted for publication 15.11.2016

Abstract

Laser pulse simulation of the surface waves and its receiving by contact piezoelectric probes is perspective direction to detect surface defects. The aim of this work was to determine optimal conditions for detection of the real fatigue cracks of nearly microns width and surface pores by moving depending on the position of the center of a laser beam laser beam spot.

The objects of research were metal specimens with crack's width of 8 μ m up to 0,5 mm and depth \approx 400–500 μ m up to \approx 200 μ m. Cylindrical hole by \approx 1 mm diameter used as a model pore. An experimental installation used consisted of the pulse laser light emission source with laser wavelength of 1.06 μ m and laser pulse duration of \approx 20 ns. An arrangement to adjust the laser beam spot geometry in the form of a long strip and a circle was applied. Surface waves were received by the 2.7 MHz frequency probe, and processed with use of a «Spectronic» TDS 3052B oscilloscope.

The laws of acoustical signal amplitude and its form changes vs. the laser beam spot geometry and its position in regard to defect were determined. We discovered that optimal conditions for flaw detection took place when the laser beam spot moving trough the defect's range – crack and pore. In the first case amplitude growth of the signal was up to 7–8 time – like as resonance conditions realized. And the ratio of the laser's beam spot width (as long strip) to wave length were \approx 1.8–2.2. The more informative parameter to find crack with small width (\approx 0.5mm) was the acoustical pulse spectrum or the pulse entrance part.

Thus, the further increasing of the surface flaw detection may be realized by laser simulation of the surface waves controlling the form of the moving spot of laser beam. New possibilities to increase sensitivity and reliability of ultrasonic evaluation surfaces in objects with complicated profile and fare accessible places are to be arise.

Keywords: impulse-laser radiation, surface waves, ultrasound probe, crack.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Митьковец А.И., Костюк Д.А., Коновалов Г.Е.
Особенности обнаружения поверхностных несплошностей с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

For citation:

Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Konovalov G.E.
[Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 286–295 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Введение

Возбуждение и прием упругих волн (УВ) в твердых телах с помощью лазерной техники перспективно в области неразрушающего контроля и диагностики твердых и жидких сред [1–3]. При этом возможны различные варианты использования как оптического источника генерации УВ, так и их приемника, включая комбинированные схемы прозвучивания объекта [4–8]. Высокие требования к состоянию поверхности контролируемого объекта, его геометрии, а также низкая чувствительность существенно ограничивают использование бесконтактных оптических схем приема [2], как правило, стенами лабораторий. Перспективны комбинированные методы измерений, сочетающие использование источника импульсно-лазерного излучения и приемника возбуждаемых волн преимущественно в виде электромагнитно-акустического или пьезоэлектрического (контактного) преобразователя (ПЭП).

В настоящее время наиболее простая и эффективная схема прозвучивания объектов сложного рельефа и расположенных в труднодоступных местах реализуется с помощью компактных генераторов импульсно-лазерного излучения и разнообразных конструкций (ПЭП) с наклонными призмами для приема объемных, поверхностных, пластинчатых волн [9]. Ввиду значительных трудностей при возбуждении указанных мод непосредственным воздействием импульсного лазерного луча (ЛЛ) на поверхности объекта может быть размещена твердотельная или удерживаемая магнитным полем магнитоэластичная клиновидная прослойка с углом клина β , скорость в которой C_k [7]. При этом достигается наибольший коэффициент передачи энергии излучения в объемные и пластинчатые волны согласно схеме: ЛЛ \rightarrow внешняя поверхность клина, покрытая светопоглощающим слоем \rightarrow граница контакта клина с объектом \rightarrow материал объекта, где угол α_m – максимум оси диаграммы направленности возбуждаемой моды $\Phi(\alpha, \theta)$, определяется из закона Снеллиуса: $\alpha_m = \arcsin(C_k/C \sin\beta)$, где $C = C_{T,L,S,P}$ – скорость поперечной (Т), продольной (L), поверхностной (S) и пластинчатых (P) симметричных и ассиметричных упругих мод. Именно в этом случае наблюдается режим линейного возбуждения УВ достаточно высокой интенсивности, что весьма важно при реализации высокочастотных акустических измерений. Так

что амплитуда возбуждаемых в призме колебаний $A \sim J_L < J_{0L}$, где J_L – интенсивность падающего излучения; J_{0L} – пороговое значение интенсивности, при превышении которого нарушается эта линейность. Использование в качестве материала клина магнитной жидкости, преобразующей излучение в продольные УВ позволяет управлять диаграммой направленности $F(\alpha, \theta)$ путем изменения угла ее наклона или ее кривизны, фокусируя акустический луч в объекте [10].

На первом этапе исследований рассмотрим более простую ситуацию, когда в качестве зондирующих используются поверхностные акустические волны (ПАВ), возбуждаемые при непосредственном падении ЛЛ на объект и наблюдается максимальный коэффициент оптоакустического (ОА) преобразования $K_{OA} = J_L/J_A$, где J_A – интенсивность ПАВ. Ниже проанализируем некоторые возможности выявления поверхностных дефектов путем использования ПАВ, возбуждаемых при оптоакустическом преобразовании.

Краткий анализ некоторых возможностей выявления поверхностных и подповерхностных дефектов с помощью поверхностных акустических волн, возбуждаемых лазерным излучением

Как известно [1], с помощью ПАВ представляется возможным выявлять поверхностные и подповерхностные несплошности, лежащие на глубине $h \sim \lambda_s - 2\lambda_s$, где λ_s – длина поверхностной волны. Один из возможных классических вариантов их определения иллюстрируется на рисунке 1, где источник ПАВ расположен вне зоны несплошности. В процессе перемещения пятна ЛЛ, являющегося источником поверхностной волны, по заданной траектории рассеянные дефектом импульсы акустического сигнала принимаются одним или несколькими компактными ненаправленными ПЭП. Согласно схеме (рисунок 1а), пятно ЛЛ имеет форму круглого пятна, так что из-за расхождения его амплитуда убывает с расстоянием по закону $\sim r^{0.5}$. При этом угол между осью индикатрисы рассеяния отраженного от трещины импульсного сигнала ПАВ и радиусом-вектором r , проведенным к трещине, равен $\phi = \arcsin[(nr/r)]$, где n – единичный вектор нормали к плоской трещине. Таким образом, существенное ослабление сигнала из-за расхождения волны с расстоянием и особенности ее отражения от дефекта могут су-

существенно усложнить процесс измерений и снизить его производительность.

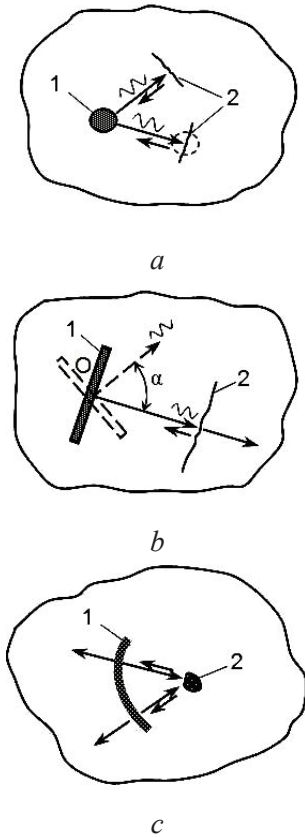


Рисунок 1 – Некоторые возможные способы возбуждения поверхностных акустических волн лазерным лучом для обнаружения поверхностных дефектов: пятно лазерного луча круглое (а), подобно длинной полосе (b), дуге (c); 1 – пятно лазерного луча; 2 – дефект

Figure 1 – Some possible ways of SAW simulation by laser beam to find defects: spot of the laser beam is round (a), like as a long stripe (b), as an arc (c); 1 – beam spot; 2 – defect

Для улучшения выявляемости поверхностных дефектов может быть использована схема возбуждения ПАВ качающимся или вращающимся лазерным лучом типа «длинная полоса», что позволяет прозвучивать контролируемую зону под различными углами и «оптимизировать» условия отражения зондирующего сигнала от трещины. Однако при этом существуют такая ориентация трещины, при которой обнаружение сигнала-отклика маловероятно. Кроме того, чувствительность к обнаружению локальных дефектов типа поры или инородного включения невысокая. Этот недостаток может быть устранен

путем придания определенной формы пятну ЛЛ, служащей в качестве источника концентрируемых (фокусируемых) волн. Как видно, это может быть реализовано, когда пятно ЛЛ сформировано в виде одной или несколько соосных дуг, имеющих радиусы R_i и толщину $d_i < 0,5\lambda_s$, величины которых выбраны из условия минимизации шумового фона, создаваемого излучаемыми в обратном направлении волнами. Изменяя положение фокуса и его положения за счет варьирования R_i и углового качания или вращения пятна ЛЛ, представляется возможным существенно повысить чувствительность и надежность выявления дефектов с низким коэффициентом отражения K_R , обусловленным малыми геометрическими размерами и ориентацией.

Основной недостаток применения указанных схем выявления трещин в теновом режиме и режиме эхо, а также и других подобных (с использованием ОА-возбуждения) заключается в том, что наличие на поверхности объекта мелких рисок (глубиной $\approx 5\text{--}10$ мкм), наличие загрязнений и пространственной неравномерности затухания ПАВ существенно затрудняют применение не только указанного метода, но и других, включая оптический, термоволновой, фотоакустический, тепловой.

Одно из перспективных направлений повышения чувствительности и надежности выявления поверхностных дефектов заключается в использовании метода, основанного на анализе зависимости параметров акустического сигнала именно при пересечении дефекта пятном ЛЛ [5]. В данном случае в качестве объекта исследования служил металлический образец с технологической прорезью шириной $d = 50$ мкм, глубиной $h \gg \lambda_s$ и параллельными стенками. При реализации измерений, поясняемых рисунком 2, пятно ЛЛ, подобное длинной полосе с поперечным размером D , перемещается вдоль координаты x .

Если пятно расположено вне зоны трещины ($D/2 < x_0 < -D/2$), то наблюдается плавное изменение амплитуды сигнала с расстоянием от центра пятна ЛЛ x_0 до координаты искусственной трещины ($x = 0$). Но если $-D/2 < x_0 < D/2$, то функция $A(w)$ при положении центра пятна ЛЛ в окрестности $x \rightarrow 0$ претерпевает существенные изменения. При этом функция, описывающая зависимость $A(x)$, подобна резонансной кривой. Таким образом, именно в этих условиях чувствительность измерений резко возрастает, что

представляет значительный интерес для дальнейшего усовершенствования ультразвуковых методик выявления поверхностных несплошностей с помощью ПАВ, возбуждаемых лазерным лучом.

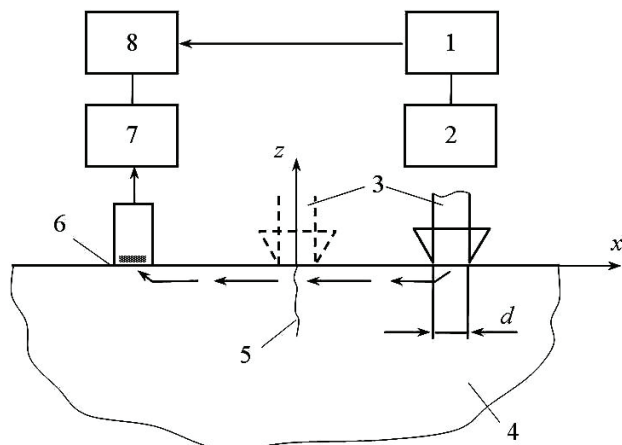


Рисунок 2 – Базовая схема экспериментальной установки по исследованию влияния положения пятна лазерного луча относительно трещины на амплитуду поверхностных акустических волн: 1 – лазер; 2 – устройство коррекции луча; 3 – пятно ЛЛ; 4 – образец; 5 – трещина; 6 – приемник поверхностных акустических волн; 7 – усилитель; 8 – осциллоскоп «Spectronic» TDS 3052B

Figure 2 – Basic scheme of the experimental installation to study the influence of the placement of laser beam spot relative to the crack on the surface acoustic wave amplitude: 1 – laser; 2 – beam correction device; 3 – laser beam spot; 4 – sample; 5 – crack; 6 – surface acoustic wave receiver; 7 – amplifier; 8 – the «Spectronic» TDS 3052B oscilloscope

Необходимо отметить, что обсуждаемые результаты исследований были получены на искусственных образцах с модельной трещиной, внутренние стенки которой плоскопараллельные, а ширина раскрытия трещины δ на порядок больше потенциально опасных для функционирования современных конструкций и сооружений. Кроме того, в указанной работе не изучалось влияние размеров пятна ЛЛ на параметры сигнала-отклика, что весьма важно с точки зрения реализации конкретных высокочувствительных методик контроля на практике.

В настоящей работе для прояснения особенностей проявления упомянутого эффекта и выявления новых закономерностей были проведены дополнительные исследования. При этом в качестве объекта исследований использованы образцы с реальными (усталостными) трещи-

нами, имеющими совершенно другую геометрию внутренних стенок. Ширина же раскрытия трещины практически на порядок меньше, чем в упомянутой выше работе. Кроме того, что весьма важно, в процессе исследований изучалось влияние геометрии пятна ЛЛ на параметры акустического сигнала при прохождении пятна ЛЛ через область с реальной усталостной трещиной, а также модельной поры. Отметим, что в основной части исследований при получении зависимостей $A(x_0)$ варьировалась безразмерная ширина пятна ЛЛ $d^* = d/\lambda$, подобное длинной полосе или кругу.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема исследований представлена на рисунке 2. Установка содержит источник импульсного лазерного излучения, систему коррекции сечения светового пучка, падающего на исследуемый образец, приемник акустических колебаний, в качестве которого использованы пьезоэлектрические наклонные (направленные) преобразователи, усилительный блок и блок его согласования с осциллоскопом «Spectronic» TDS 3052B. Длина волны источника лазерного излучения равна 1,06 мкм.

В качестве образцов с усталостными дефектами (модельными трещинами) и прошедшими аттестацию служили металлические пластины толщиной 7 мм, шириной 30 мм и длиной 70 мм. Усталостные трещины на их поверхности выполнены вдоль короткой стороны методом многоциклового нагружки, разработанном в Институте прикладной физики НАН Беларуси. Геометрические характеристики трещин следующие: для образца № 1 ширина раскрытия устья трещины $\delta \approx 8$ мкм, глубина $h = 400\text{--}500$ мкм; для образца № 2 – $\delta \approx 4$ мкм, $h \approx 300\text{--}400$ мкм; их длина 30 мм. Образцы трещин идентичны реальным и входят в комплект настроечных образцов для капиллярной дефектоскопии. Образец № 3 ($h^* \approx 100\text{--}200$ мкм, $\delta \approx 8\text{--}10$ мкм моделируется путем контакта двух идентичных стальных плиток, между торцевыми поверхностями которых введены жесткие прокладки. Для приема ПАВ использован наклонный ПЭП рэлеевской волны с рабочей частотой $f = 2,7$ МГц и магнитным удержанием контактной жидкости.

Регулирование формы пятна ЛЛ (типа полосы или круглого пятна) достигалось специальной

оптической корректирующей системой; оценка размеров этого пятна производилась путем засвечивания лазерным лучом фотопленки. Размеры засвеченной области измерялись с помощью микроскопа. При проведении исследований ширина пятна ЛЛ типа длинная полоса варьировалась от 0,2–0,3 до 5 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Основные результаты исследований иллюстрируются на рисунках 3–5. На рисунке 3 пред-

ставлены осциллограммы сигнала на приемном преобразователе наклонного ПЭП при относительном перемещении пятна ЛЛ типа длинная полоса, когда зона возбуждения ПАВ лежит вне дефекта (рисунки 3а и 3б) и охватывает последний (рисунки 3с и 3д). Рисунок 4 иллюстрирует особенности изменения амплитуды сигнала в зависимости от расстояния пятна ЛЛ до трещины. Зависимость же амплитуды акустического сигнала на преобразователе при изменении положения центра круглого пятна ЛЛ диаметром 3 мм относительно моделируемой бесконечно глубокой трещины представлена на рисунке 5.

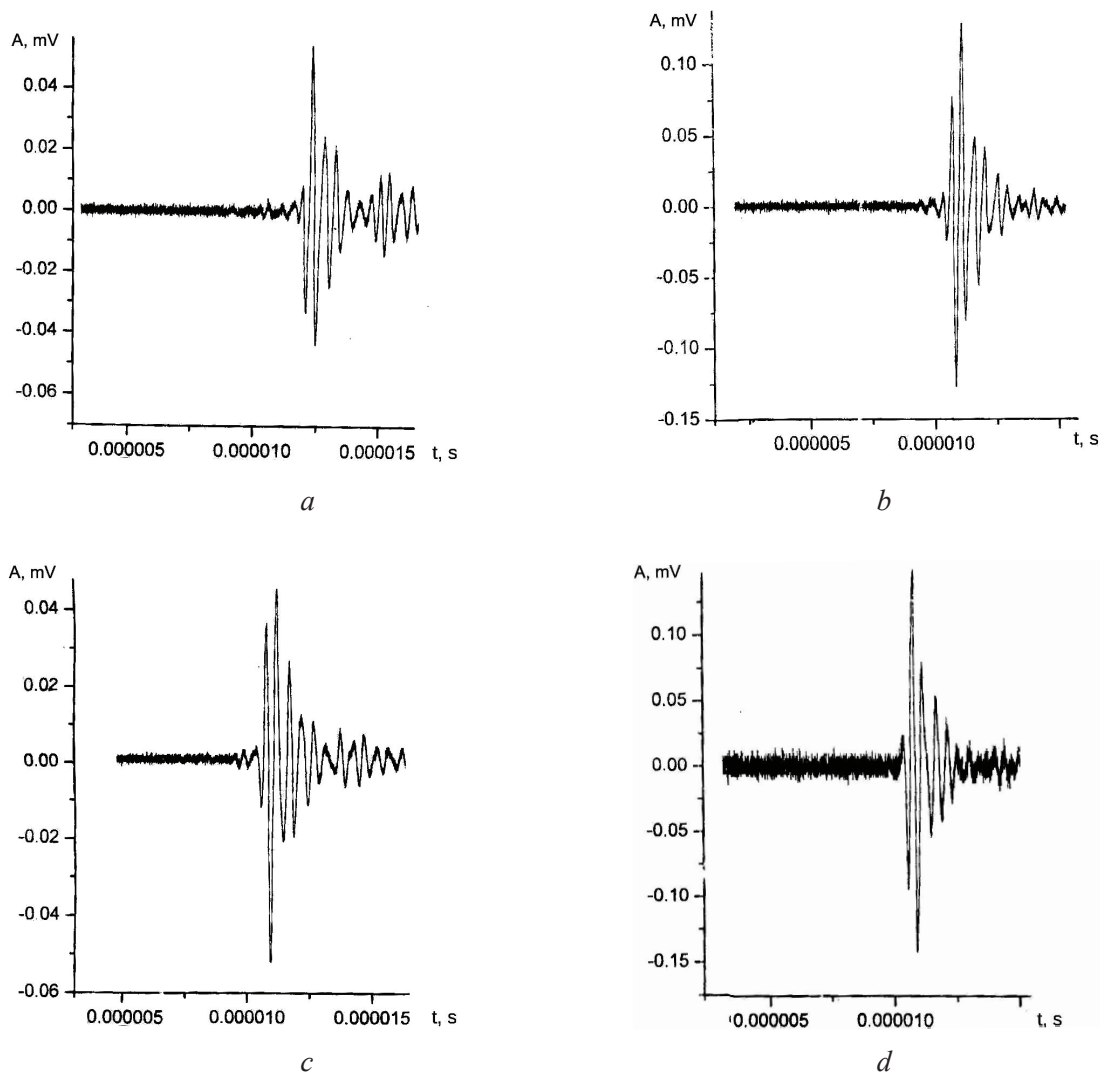


Рисунок 3 – Осциллограммы акустического импульса на приемном преобразователе при изменении положения центра пятна лазерного луча, подобного длинной полосе, на образце с усталостной трещиной шириной $\delta = 4$ мм, глубиной $h = 400\text{--}500$ мкм и длиной 30 мм: x_0 , мм = 3 (а); –3 (б); 0,5 (с); –0,5(д); ось ординат в мВ, безразмерная ширина пятна лазерного луча $d^* = d(tC_R)^{-1} = 2,2$

Figure 3 – Oscillograms of an acoustic pulse on the receiving probe at a placement change of the laser beam spot center like a long stripe, on the sample with a fatigue crack of $\delta = 4$ μm width, $h = 400\text{--}500$ μm depth, and 30 mm length: x_0 , mm = 3 (a); –3 (b); 0.5 (c); –0.5(d); non-dimensional width of the laser beam spot $d^* = d(tC_R)^{-1} = 2.2$

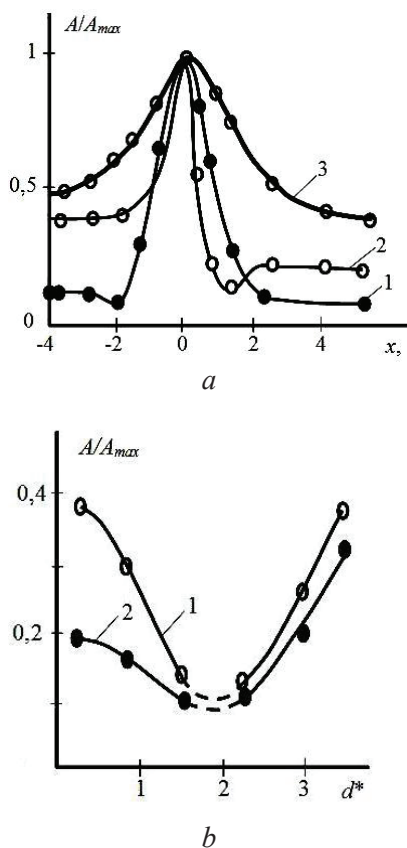


Рисунок 4 – Нормализованная амплитуда акустического сигнала на преобразователе в зависимости от положения центра пятна лазерного луча типа длинной полосы (а) и от ширины d^* пятна лазерного луча (b). а: 1 – $d^* = 2,2$; 2 – 0,2; 3 – 5; b: 1 – A измерено при $x = -4$ мм; 2 – $x = 4$ мм

Figure 4 – Amplitude of an acoustic signal vs. coordinate of the laser beam spot center of a long stripe type (a) and vs. width of the laser beam spot d^* (b). a: 1 – $d^* = 2.2$; 2 – 0.2; 3 – 5; b: amplitude of A measured at $x = -4$ mm (1) and $x = 4$ mm (2)

Результаты экспериментального исследования образцов с реальными усталостными трещинами убедительно подтверждают эффективность методического подхода (по сравнению с традиционным), основанного на использовании такой схемы прозвучивания, при которой анализируется амплитуда и (или) его спектр акустического импульса при пересечении пятном ЛЛ дефектной зоны. Это является основой повышения надежности и достоверности выявления несплошностей. Так, если дефектом служит трещина с раскрытием 4 мкм, то эффективность возбуждения ПАВ наибольшая в том случае, когда центр пятна ЛЛ находится в окрестности координаты трещины ($x = 0$), что сопровождается резким ростом амплитуды зондирующего сигнала на приемном

ПЭП и изменением его формы. Как установлено, максимальное увеличение амплитуды сигнала, характеризуемое коэффициентом $\varepsilon_A = A_{max}/A$, достигает 7–8 раз, если ширина пятна ЛЛ выбрана оптимальной величины, которая для данного эксперимента (в безразмерном виде) лежит в диапазоне $d^* = d/\lambda_{ПАВ} = 1,8–2,2$, где A соответствует минимуму амплитуды сигнала при положении центра пятна ЛЛ в окрестности $-4 \text{ мм} \leq x \leq 4 \text{ мм}$. Следует также отметить, что возбуждение ПАВ сопровождается появлением так называемых сателлитов – импульсов, последующих за основным импульсом. Проведенные нами дополнительные исследования [10] показали, что они представляют собой трансформированные на вершине трещины и переотражаемые между базовыми поверхностями поперечные волны. Последние могут быть использованы как для определения глубины трещины, так и для выявления под ними объемных дефектов. (Это же относится и к случаю, когда на поверхности объекта выполнены технологические проточки.)

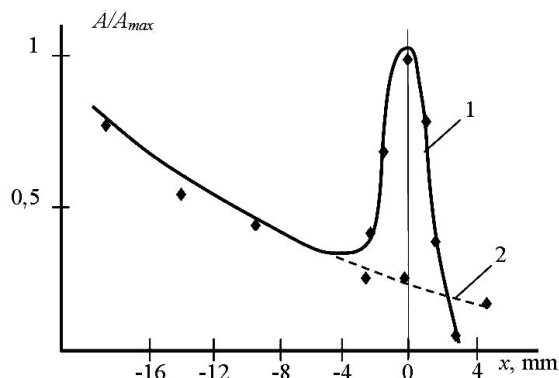


Рисунок 5 – Зависимость нормализованной амплитуды акустического сигнала на преобразователе при изменении положения центра круглого пятна лазерного луча диаметром 3 мм относительно моделируемой бесконечно глубокой трещины

Figure 5 – Dependency of the acoustic signal normalized amplitude on probe at placement change of the round laser beam spot center with 3 mm diameter relative to the modeled infinitely deep crack

Интересным является тот факт, что относительный рост амплитуды сигнала при перемещении пятна ЛЛ через трещину с раскрытием $\approx 0,5$ мкм (образец № 4) и длиной $\approx 3–4$ мм составил $\approx 50–60$ %. В этом случае наиболее информативным признаком, характеризующим наличие дефекта, служит именно форма «вступительной» части осцилляции импульса, обусловленная сложным характером формирования сигнала-от-

клика при перемещении пятна ЛЛ в окрестности трещины. Таким образом, повышение чувствительности рассматриваемого метода может быть достигнуто путем использования специальных методов спектральной обработки акустического сигнала.

Следует обратить внимание на то, что если пятно ЛЛ имеет форму круга ($2r = 3$ мм), то изменение (возрастание) амплитуды сигнала при движении пятна через дефектную зону достигает приблизительно 3 раз, т.е. меньше, чем в случае, когда пятно ЛЛ подобно длинной полосе. Однако в этом случае диаграмма направленности $\Phi(\alpha)$ такого источника существенно шире, что позволяет фиксировать дефект, используя меньшее количество приемных преобразователей, включая ненаправленные преобразователи.

Важный результат получен при исследовании рассеяния акустической энергии модельным дефектом типа «бесконечная пора», моделируемая цилиндрическим отверстием диаметром 1 мм. Как установлено, характер изменения формы акустического сигнала при пересечении пятном ЛЛ модельного дефекта подобен тому, какой обнаружен при исследовании образцов с трещинами. Однако при варьировании диаметра пятна ЛЛ и его соосного расположения с главной осью модельной поры было установлено, что даже при достижении соотношения площади дефекта S_D к площади пятна S_L : $\xi_D = S_D/S_L \approx 0,04$ – амплитуда зондирующего сигнала может возрасти в 3–4 раза и более по сравнению с тем случаем, когда дефект отсутствует.

Необходимо отметить, что аналитическое описание оптоакустического тракта рассматриваемой задачи даже в частном случае весьма затруднительно и зависит от комплекса параметров. Среди них физико-механические свойства материала, размеры трещины и степень сжатия ее стенок, спектральные функции возбуждаемых ЛЛ колебаний и их приема преобразователем, а также коэффициента прохождения или преобразования энергии волны на трещине, являющегося весьма сложной функцией не только от указанных 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 перемещении пятна ЛЛ через трещину ($x_0 \rightarrow 0$) теплообмен и передача упругих возмущений между ее

стенками затруднены, т.к. $\sigma_{ik} \rightarrow 0$ и $q_n \rightarrow 0$, где σ_{ik} – тензор напряжений, q_n – тепловой поток, направленный нормально к стенке трещины. Поэтому в общем случае можно считать, что в формировании ПАВ участвуют два источника с изменяемыми (по мере пересечения области с трещиной) поперечными размерами d_1 и d_2 , для которых $d_1 + d_2 = d$. Именно для этого случая передаточная функция измерительного тракта для ПАВ может быть условно представлена в общем виде:

$$\Xi = \tilde{\mathfrak{Z}}\tilde{R}(\tilde{\Psi}^+ + \tilde{\Lambda}\tilde{\Psi}^-),$$

где $\tilde{\mathfrak{Z}}$ – функция приема ПАВ; \tilde{R} – функция прохождения возбуждаемого акустического импульса от зоны расположения трещины до приемного ПЭП; Ψ^+ и Ψ^- – интегральные функции, характеризующие поле двух источников ПАВ, находящиеся в области поверхности воздействия пятна лазерного луча площадью $S = S^+ + S^-$, где индекс (+) соответствует области возбуждаемых волн, лежащей ближе к ПЭП, а индекс (–) – дальше; $\tilde{\Lambda}$ – характеризует эффективность прохождения возбуждаемых волн через своеобразный (звуковой) барьер, создаваемый несопностью.

Очевидно, что при $h \rightarrow 0$ $\tilde{\Lambda} \rightarrow 1$, и практически половина потока энергии ПАВ будет распространяться в направлении, противоположном приемному преобразователю. В этом случае на границе главной оси пятна ЛЛ $x = x_0$ создаются условия, подобные условию теплоизоляции. Если же глубина трещины достаточно большая ($h \gg \lambda$), а тепловой контакт между стенками отсутствует, то $\tilde{\Lambda} \rightarrow 0$. Однако при пересечении пятном ЛЛ трещины и его оптимальном положении плотность потока ПАВ, направленного к приемному преобразователю, повысится в результате отражения от одной из стенок трещины. (Кроме того, возрастание амплитуды принимаемого сигнала ПАВ будет наблюдаться и при достижении источником ПАВ (расположенного от трещины ближе к ПЭП), характерного волнового размера kd_1 , соответствующего рабочей частоте преобразователя или ее первой гармонике.) В то же время вследствие проявления этого резонансного явления сигнал на приемном ПЭП может и уменьшиться. Так что наблюдаемые изменения амплитуды ПАВ при варьировании ширины трещины и на приемном ПЭП в 7–8 раз вполне понятны.

Необходимо отметить, что результаты настоящих исследований представляют интерес для создания высокочувствительных методик обна-

ружения поверхностных дефектов в объектах, расположенных в труднодоступных местах, имеющих сложный рельеф поверхности, а также находящихся в движении, включая объекты железнодорожного транспорта, автотракторостроения, теплоэнергетики. При этом один или несколько компактных приемных преобразователей автономно располагают на объекте в зоне повышенной опасности. Проверка дефектности изделия производится путем возбуждения ПАВ внешним источником импульсно-лазерного возбуждения.

Заключение

Проанализированы некоторые схемы обнаружения поверхностных дефектов с использованием импульсно-лазерного возбуждения поверхностных волн и приема их контактными преобразователями. Обращено внимание на эффективность использования для этих целей режима прозвучивания объекта при прохождении пятна лазерного луча именно через зону с дефектом – трещиной или порой.

На основе разработанной установки с источником импульсно-лазерного излучения с длительностью импульса 20 нс и длиной волны 1,06 мкм впервые получены зависимости амплитудных параметров генерируемых лазерным излучением поверхностных волн при прохождении пятном лазерного луча зоны с реальными усталостными трещинами, имеющими ширину раскрытия от 8 до 0,5 мкм.

Установлено, что оптимальные условия выявления дефекта по амплитудному признаку имеют место при определенном значении отношения ширины пятна лазерного луча D к длине поверхностной волны λ_s , что характерно для резонансного режима возбуждения. Таким образом, при возбуждении поверхностных волн импульсно-лазерным излучением представляется возможным существенно повысить выявляемость поверхностных дефектов путем варьирования размеров пятна лазерного луча, пересекающего реальную усталостную трещину, что подтверждается ростом амплитуды рассеянной волны в 7–8 раз при ширине раскрытия усталостной трещины приблизительно 4 мкм. В ряде случаев, когда ширина раскрытия трещин достигает приблизительно 0,5 мкм и менее, предлагается уменьшить длительность импульса и повысить резонансную частоту приемного преобразователя либо использовать вступительную часть импуль-

са в качестве информативного параметра дефектности объекта. Экспериментально показано, что при отношении площади дефекта в виде поры к площади пятна лазерного луча приблизительно 4 % изменение амплитуды рассеянной поверхностной волны составляет 4–5 раз, что позволяет существенно сократить время контроля объектов указанным комбинированным методом.

Результаты настоящих исследований представляют интерес для создания высокочувствительных методик обнаружения поверхностных дефектов в объектах, расположенных в труднодоступных местах, имеющих сложный рельеф поверхности, а также находящихся в движении, включая объекты железнодорожного транспорта, автотракторостроения, теплоэнергетики. При этом один или несколько компактных приемных преобразователей автономно располагают на объекте в зоне повышенной опасности. Проверка дефектности изделия производится путем возбуждения ПАВ внешним источником импульсно-лазерного возбуждения.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект Т15-163 от 4 мая 2015 г.

Список использованных источников

1. Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. – М. : Наука, 1991. – 304 с.
2. Xie, Z. Pure optical photoacoustic microscopy / Z. Xie [et al.] // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19, no. 10. – P. 9027–9034.
3. Pouet, B. An Innovative Interferometer for Industrial Laser Ultrasonic Inspection / B. Pouet, S. Breugnot // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 24B. – 2004. – P. 273–281.
4. Hirose, S. Ultrasonic Inversion for Determining crack in a solid / S. Hirose // J. of The Faculty of Environmental Science and Technology. – 1997. – Vol. 2, no. 1. – P. 89–98.
5. Krishnaswamy, S. Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2003. – Vol. 20A. – P. 436–492.
6. Podymova, N.B. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CERP laminates / N.B. Podymova, A.A. Karabutov // J. of Non-destructive Evaluation, USA. – Vol 33, no. 1. – P. 141–150.
7. Способ оптоакустического контроля качества неразъемного соединения двух материалов : пат.

на изобретение Респ. Беларусь G01N N 20111234 / А.Р. Баев, В.Г. Гуделев, А.И. Митьковец. – заявл. 09.2011; опубл. 30.08.2013.

8. Kolkman, R.G.M. Feasibility of noncontact piezoelectric detection of photoacoustic signals in tissue-mimicking phantoms / R.G.M. Kolkman [et al.] // *J. Biomed Opt.* – 2010. – Vol. 15, no. 5. – P. 055011.

9. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М. : Наука, 1981. – 288 с.

10. Baev, A.R. Formation of the Acoustical Field of a Rayleigh –Wave Transducer in an Object with a Protrusion Part II / A.R. Baev, M.V. Asadchaya, O.S. Sergeeva, G.E. Konovalov // *Applied Problems Russian Journal of Nondestructive Testing.* – 2014. – No. 7. – P. 25–32.

This work was performed by partial support of Belarusian Republic Fond of Fundamental Researches: project № T15-163, May 4, 2015.

References

1. Gusev V.E., Karabutov A.A. *Lasernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 304 p. (in Russian).

2. Xie Z., Chen S.L., Ling T., Guo L.J., Carson P.L., Wang X. Pure optical photoacoustic microscopy. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 9027–9034.

doi: org/10.1364/OE.19.009027

3. Pouet B., Breugnot S. An Innovative Interferometer for Industrial Laser Ultrasonic Inspection. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2004, vol. 24B, pp. 273–281. doi: org/10.1063/1.1916688

4. Hirose S. Ultrasonic Inversion for Determining crack in a solid. *J. of The Faculty of Environmental Science and Technology*, 1997, vol. 2, pp. 89–98.

5. Krishnaswamy Sridhar. Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003, vol. 20A, pp. 436–492.

6. Podymova N.B., Karabutov A.A. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CERP laminates. *J. of Nondestructive Evaluation*, 2005, vol. 33, pp. 141–150.

doi: 10.1007/s10921-013-0210-z

7. Baev A.R., Gudelev V.G., Mitscovets A.I. *Sposob optoakusticheskogo kontrolya kachestva nerazjemnogo soedineniya dvukh materialov* [Optoacoustic method of the materials contact quality evaluation]. Pat. RB, no. 20111234, 2011.

8. Kolkman R.G.M., Blomme E., Cool T., Bilcke M., Leeuwen T.G. van, Steenbergen W., Grimbergen K.A., Heeten G.J. den. Feasibility of noncontact piezoelectric detection of photoacoustic signals in tissue-mimicking phantoms. *J. Biomed. Opt.*, 2010, pp. 55–64.

doi: 10.1117/1.3491113

9. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 288 p. (in Russian).

10. Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Konovalov G.E. Formation of the Acoustical Field of a Rayleigh Wave Transducer in an Object with a Protrusion, Part II. *Applied Problems. Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 24, pp. 25–32.

doi: 10.1134/S1061830914080038