

УДК 534-16

## ЛАЗЕРНАЯ ФОТОАКУСТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНКАХ С ОТВЕРСТИЕМ

А. Л. Глазов<sup>1,\*</sup>, академик РАН Н. Ф. Морозов<sup>2,3</sup>, К. Л. Муратиков<sup>1</sup>

Поступило 26.09.2018 г.

Исследован характер изменения фотоакустического сигнала вокруг отверстия в образцах из дюралюминия. Сравниваются экспериментальные результаты с решением классической задачи для распределения напряжений вокруг круглого отверстия в предварительно напряжённой пластине. Продemonстрировано хорошее соответствие поведения фотоакустического сигнала с пьезоэлектрической регистрацией и распределения напряжений вокруг отверстия. Показана возможность оценки внутренних напряжений фотоакустическим методом в сочетании с методом сверления отверстий.

**Ключевые слова:** фотоакустическая сканирующая микроскопия, термоупругость, металлы, напряжения, задача Кирша.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843277-280>

Лазерные ультразвуковые и фотоакустические (ФА) методы с успехом используются для получения информации о механических, термоупругих и теплофизических свойствах объёмных материалов, твёрдотельных структур и тонких плёнок [1, 2]. В последнее время высказывается мнение, что лазерные ультразвуковые и ФА-методы будут играть важную роль при диагностике изделий, изготавливаемых методами аддитивных технологий и 3D-печати [3].

Наряду с указанными вопросами вызывает интерес применение методов лазерной ФА-микроскопии для диагностики внутренних напряжений в различных материалах. В работах [4, 5] экспериментально установлено наличие особенностей ФА-сигналов вблизи концов микротрещин в керамиках. В последующих работах для керамик  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [6] и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC—TiC}$  [7] показано, что наблюдаемые особенности ФА-сигналов хорошо соответствуют теоретическим моделям, описывающим поведение напряжений вблизи концов трещин [8].

Для металлов же детального экспериментального и теоретического исследования поведения ФА-сигналов в металлических образцах в условиях с хорошо известным характером распределения напряжений до настоящего времени не проводилось. В работах [9–11] было экспериментально показано, что внут-

ренние и внешние механические напряжения в металлах существенно влияют на характеристики ФА-сигналов в зонах индентации по Виккерсу. Однако сложность структуры отпечатков по Виккерсу не позволила оценить степень влияния напряжений в металлах на параметры ФА-сигналов.

Целью данной работы являлось изучение связи ФА-сигналов и напряжений для металлов на примере модельной задачи, для которой распределение напряжений хорошо известно. В качестве объекта исследования была выбрана металлическая пластина с отверстием, вблизи которого распределение напряжений хорошо известно [12, 13]. Исследование поведения ФА-сигналов вблизи отверстия в металлах имеют и определённый дополнительный интерес, поскольку допускают сравнение с данными, полученными методом сверления отверстий с использованием тензометрических датчиков или голографической и спекл-интерферометрии [14].

В данной работе экспериментальные исследования были проведены на образцах из алюминиевого сплава Д16, в центре которых были просверлены отверстия. Известно, что для определения слабых напряжений интерферометрическими методами необходимо сверление отверстий достаточно большого диаметра [14]. Поэтому для выяснения потенциальных возможностей лазерного ФА-метода по регистрации напряжений в алюминиевом сплаве сверлилось отверстие малого диаметра 0,2 мм. В работе использовались образцы двух типов, вырезанные из одной пластины. Размер образцов первого типа составлял  $6 \times 6$  мм, а второго —  $3 \times 6$  мм. Толщина

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской Академии наук, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения  
Российской Академии наук, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

\*E-mail: [glazov.holo@mail.ioffe.ru](mailto:glazov.holo@mail.ioffe.ru)

образцов в обоих случаях равнялась 3,6 мм. Частота модуляции сфокусированного на поверхность лазерного излучения и возбуждаемых в образце акустических волн составляла 141 кГц, а регистрация ФА-сигналов осуществлялась пьезоэлектрическим методом. Формирование изображения производилось методом сканирующей лазерной ФА-микроскопии с шагом 10 мкм.

Экспериментальные данные сравнивали с известным решением задачи о распределении напряжений вокруг круглого отверстия в пластине [12, 13]. Из теории образования лазерных ФА-сигналов по термоупругому механизму известно, что в квазистатическом приближении [9–11] величина сигнала определяется коэффициентом теплового расширения материала в зоне воздействия лазерного излучения и может быть представлена в виде

$$S(\mathbf{r}, \omega) = K(\omega)\alpha_T(\sigma), \quad (1)$$

где  $\omega$  — круговая частота модуляции лазерного излучения;  $K(\omega)$  — некоторый коэффициент, определяемый свойствами пьезодатчика и электронной схемы регистрации;  $\sigma$  — значение первого инварианта тензора напряжений в исследуемой области;  $\alpha_T(\sigma)$  — коэффициент теплового расширения материала с учётом присутствующих в нём напряжений.

Из термодинамических принципов связь коэффициента теплового расширения материала с присутствующими в нём напряжениями может быть получена в виде [15]

$$\alpha_T(\sigma) = \alpha_T + c\sigma(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где  $c$  — некоторый коэффициент пропорциональности;  $\alpha_T$  — коэффициент теплового расширения ненапряжённого материала.

В соответствии с решением задачи для отверстия в пластине [13] с двухосными однородными напряжениями первый инвариант тензора напряжений в пластине определяется равенством

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_y = (\sigma'_x + \sigma'_y) - (\sigma'_x - \sigma'_y) \frac{2a^2}{r^2} \cos 2\vartheta, \quad (3)$$

где учтено, что

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \\ &+ \frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\vartheta, \\ \sigma_y &= \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\vartheta, \end{aligned}$$

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — напряжения вдоль осей  $x$  и  $y$  при наличии в пластине отверстия;  $\sigma'_x$  и  $\sigma'_y$  — однородные напряжения, присутствующие в ней в исходном состоянии; полярный угол  $\vartheta$  отсчитывается от оси  $x$ ;  $a$  — радиус отверстия.

В соответствии с равенствами (1)–(3) при периодической модуляции лазерного излучения ФА-сигнал от пластины с отверстием может быть представлен в виде

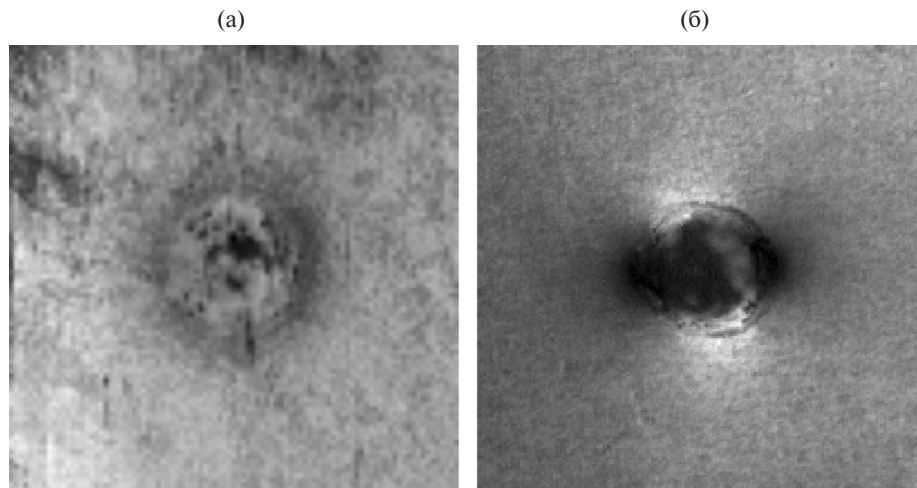
$$S(\mathbf{r}, \omega) = S_0(\omega) + S_1(\omega) + \Delta S(\mathbf{r}, \omega), \quad (4)$$

$$\Delta S(\mathbf{r}, \omega) = -K(\omega)c(\sigma'_x - \sigma'_y) \frac{2a^2}{r^2} \cos 2\vartheta,$$

где  $S_0(\omega)$  — ФА-сигнал от однородного образца без внутренних напряжений;  $S_1(\omega) = K(\omega)c(\sigma'_x + \sigma'_y)$  — поправка к ФА-сигналу из-за присутствия в нём внутренних однородных напряжений;  $\Delta S(\mathbf{r}, \omega)$  — добавка к ФА-сигналу от неоднородных напряжений, зависящая от угла и расстояния от отверстия.

В соответствии с выражением (4) зависимость от внутренних напряжений содержится в компонентах ФА-сигнала  $S_1(\omega)$  и  $\Delta S(\mathbf{r}, \omega)$ . К сожалению, из-за отсутствия зависимости сигнала  $S_1(\omega)$  от координат его поведение трудно проконтролировать методами ФА-микроскопии. Поэтому в проведённых в данной работе экспериментальных исследованиях основное внимание было уделено анализу поведения сигнала  $\Delta S(\mathbf{r}, \omega)$ , зависимость которого от угла и расстояния от отверстия надёжно контролировалась.

На рис. 1 приведены примеры изображений, полученных методами лазерной ФА-микроскопии и отражающих поведение ФА-сигналов вблизи отверстий в образцах дюралюминия Д16 с размерами  $6 \times 6$  мм и  $3 \times 6$  мм. Из представленных изображений видно существенное различие в поведении ФА-сигналов вблизи отверстий в этих образцах. Так, на рис. 1а практически отсутствует угловая зависимость ФА-сигнала, а на рис. 1б она явно присутствует. Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Все образцы вырезали из одной пластины дюралюминия. При этом в ней присутствовали остаточные напряжения с  $\sigma'_x \approx \sigma'_y$ . В этом случае при вырезании образцов с размерами  $6 \times 6$  мм это соотношение продолжает выполняться и в соответствии с выражением (4) для  $\Delta S(\mathbf{r}, \omega)$  угловая зависимость ФА-сигнала отсутствует. Для образцов с размерами  $3 \times 6$  мм соотношение  $\sigma'_x \approx \sigma'_y$  нарушается и появляется зависимость ФА-сигнала от угла и от расстояния от центра отверстия. Следует отметить, что представленное на рис. 1б ФА-изображение имеет похожую структуру с изображениями, получаемыми



**Рис. 1.** ФА-изображения образцов из сплава Д16 вокруг отверстия: а — для квадратного образца; размер изображения  $0,95 \times 0,95$  мм; б — для прямоугольного образца; размер изображения  $1 \times 1$  мм.

вблизи отверстий в напряжённых материалах методами голографической и спекл-интерферометрии [14].

Для более детального анализа соответствия поведения ФА-сигналов с напряжениями было выполнено сравнение экспериментальных результатов с теоретическим поведением напряжений вблизи отверстия. Для этого использовалось соотношение

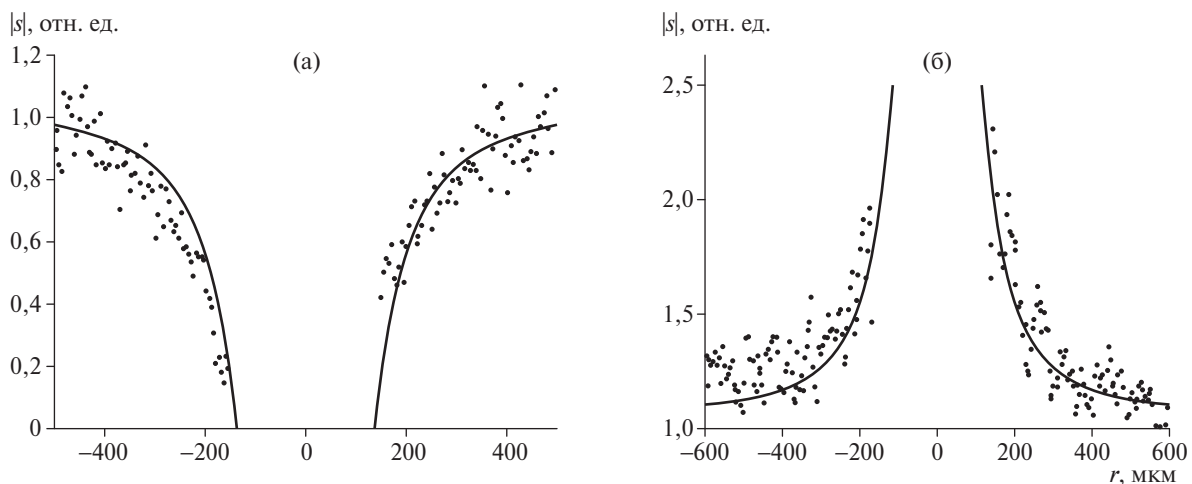
$$\frac{S(r, \vartheta)}{S_0 + S_1} = 1 - \frac{A \cos(2(\vartheta - \vartheta_0))}{r^2}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $\vartheta_0$  являются подгоночными параметрами.

Угол  $\vartheta_0$  учитывает несовпадение направления оси  $x$  на образце и направления сканирования по оси  $x$  для ФА-изображений. Целесообразность выбора соотношения (5) в предложенной форме для анализа соответствия ФА-сигналов и напряжений определяется тем, что в его левую часть входят

только экспериментально регистрируемые величины, а в правую часть — только теоретические величины. В левой части  $S(r, \vartheta)$  — это полный ФА-сигнал, регистрируемый в исследуемой точке. Сигнал  $S_0 + S_1$  представляет собой ФА-сигнал, регистрируемый вдали от отверстия. Зависимость правой части выражения (5) от угла и координаты соответствует теоретическому поведению первого инварианта тензора напряжений вблизи отверстия в пластине.

Для проверки справедливости соотношения (5) производилась подгонка параметров  $A$  и  $\vartheta_0$  с использованием процедуры минимизации среднеквадратичных отклонений экспериментальных и теоретических данных. Подгонка параметров производилась по области  $150 < r < 500$  мкм,  $0 < \vartheta < 2\pi$  вокруг отверстия. В результате были получены следующие значения параметров:  $A = 19\,516 \pm 110$  мкм<sup>2</sup>,  $\vartheta_0 =$



**Рис. 2.** Сечения ФА-изображения вдоль линий, проходящих через центр отверстия под углами к горизонтальной оси  $x$ ,  $0,125$  рад (а) и  $0,125 + \pi/2$  рад (б). Сплошные кривые соответствуют зависимости  $1/r^2$ .

$= 0,125 \pm 0,003$  рад. На рис. 2 представлены экспериментальные данные для величин ФА-сигналов в зависимости от расстояния от центра отверстия для направлений, соответствующих максимальным и минимальным значениям ФА-сигналов, и подгонные теоретические кривые, полученные для них с использованием правой части формулы (5). Представленные экспериментальные данные и погрешности для параметров  $A$  и  $\varphi_0$  показывают, что предложенная модель формирования ФА-сигналов в металлах находится в хорошем соответствии с теоретическими результатами для распределения напряжений вблизи отверстия в пластине.

Таким образом, предложенная модель формирования ФА-сигналов от металлических пластинок с отверстием в присутствии напряжений хорошо согласуется с теоретическими результатами задачи типа Кирша. При этом ФА-метод демонстрирует достаточно высокую чувствительность к механическим напряжениям в металлах.

Данная работа осуществлена в рамках проекта РНФ № 15–19–001892.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Setiwan A., Suparta G.B., Mitrayama M., Nugroho W. // Int. J. Adv. Sci. Eng. Inform. Technol. 2017. V. 7. № 6. P. 2189–2196.
2. Markushev D.D., Ordonez-Miranda J., Rabasovic M.D., et al. // Europ. Phys. J. Plus. 2017. V. 132. № 33. 9 p.
3. Millon C., Vanhoye A., Obaton A.F., Penot J.D. // Welding in the World. 2018. V. 62. № 3. P. 653–661.
4. Cantrell J.H., Qian M., Ravichandran M.V., Knowles K.M. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1870–1872.
5. Burbelo R., Gulyaev A., Robur L., et al. // J. Phys. IV Colloque. 1994. V. 4. № C7. P. C7-311–C7-314.
6. Muratkov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 5. P. 2948–2955.
7. Muratkov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E. // High Temperatures-High Pressures. 2002. V. 34. P. 585–590.
8. Муратиков К.Л., Глазов А.Л. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 8. С. 90–97.
9. Глазов А.Л., Морозов Н.Ф., Муратиков К.Л. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 2. С. 23–29.
10. Глазов А.Л., Морозов Н.Ф., Муратиков К.Л. // ФТТ. 2016. Т. 58. В. 9. С. 1679–1687.
11. Glazov A.L., Morozov N.F., Muratkov K.L. // Int. J. Thermophys. 2017. V. 38. № 7. P. 113-1–113-13.
12. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
13. Биргер И.А. Остаточные напряжения. 2-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2015. 231 с.
14. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 240 с.
15. Кунин Н.Ф., Кунин В.Н. // ФММ. 1957. Т. 5. № 1. С. 173–174.

## LASER PHOTOACOUSTIC EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN METAL PLATES WITH A HOLE

A. L. Glazov, Academician of the RAS N. F. Morozov, K. L. Muratkov

Received September 26, 2018

The nature of the change in the photoacoustic signal around the hole in samples of duralumin is studied. A comparison of the experimental results with the solution of the classical problem for stress distribution around a circular hole in a prestressed plate is made. A good correspondence between the behavior of the photoacoustic signal with piezoelectric recording and the distribution of stresses around the hole is demonstrated. The possibility of estimating the internal stresses by the photoacoustic method in combination with the hole drilling method is shown.

**Keywords:** photoacoustic scanning microscopy, thermoelasticity, metals, mechanical stress, Kirsch problem.