

05;12

О влиянии внешней механической нагрузки на поведение фотоакустического сигнала от радиальных трещин в $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ керамике, индентированной по Виккерсу

© К.Л. Муратилов, А.Л. Глазов, Д.Н. Роуз, Д.Е. Думар

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 29 ноября 2001 г.

Методом лазерной сканирующей фотоакустической микроскопии получены изображения зон индентации в $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ керамике. Продемонстрирована чувствительность фотоакустического метода с пьезоэлектрическим способом регистрации сигнала к внешним механическим напряжениям. Исследован характер изменения фотоакустического сигнала вблизи радиальных трещин под действием нормальных и касательных напряжений. Показана возможность оценки коэффициентов интенсивности напряжений вблизи концов трещин из данных фотоакустических экспериментов.

Методы фотоакустической и фототермической микроскопии в настоящее время успешно применяются для диагностики дефектов различных типов как в объеме, так и в приповерхностных слоях различных материалов и структур [1]. Вместе с тем большой интерес вызывает рассмотрение вопроса о возможности использования фотоакустического метода для регистрации внутренних механических напряжений. К настоящему моменту выполнен целый ряд исследований, демонстрирующих возможность использования фотоакустического метода для этой цели [2–12]. В большинстве из указанных работ были зарегистрированы существенные особенности в поведении фотоакустического сигнала вблизи концов трещин в хрупких материалах. Вместе с тем до настоящего времени практически не проводилось исследований, в которых поведение фотоакустического сигнала в областях с внутренними напряжениями исследовалось бы непосредственно при приложении к образцу заданных внешних нагрузок. Исследования подобного рода

позволили бы существенно улучшить понимание механизмов влияния напряжений на фотоакустический сигнал, а также создать новые методики измерения механических параметров, характеризующих поведение внутренних напряжений вблизи трещин.

В связи с этим нами было произведено исследование особенностей поведения фотоакустического сигнала от твердотельных объектов непосредственно при приложении к ним внешних механических напряжений. В данной работе основное внимание уделялось случаю, когда прикладываемые механические напряжения были направлены вдоль поверхности образца. В качестве объекта исследования использовалась керамика $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$, индентированная по Виккерсу. Достоинством подхода подобного рода следует считать известную и хорошо воспроизводимую структуру трещин, остаточных напряжений и зон пластической деформации вблизи мест индентации [13]. Ранее в работах [11,12] нами было детально исследовано поведение фотоакустического сигнала вблизи мест индентации в этой керамике, а также исследовано влияние отжига на особенности его поведения. В связи с этим в данной работе имелась возможность сравнивать особенности поведения фотоакустического сигнала от исследуемых образцов при различных внешних механических напряжениях, а также геометрии взаимного расположения внешнего напряжения и области индентации.

Экспериментальные исследования в данной работе проводились на керамике $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ (CRYSTALLOY 2311 EDX), изготовленной методом горячего прессования смеси 46.1 vol.% порошка Al_2O_3 , 23.0 vol.% порошка TiC и 30.9 vol.% нитевидных кристаллов SiC. Горячее прессование данной керамики осуществляется при температуре 1700–1800°C в атмосфере инертных газов. Керамика имеет плотность $3.915 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, что составляет 99% от теоретически максимально возможной плотности, рассчитанной исходя из плотностей ее составляющих. Средний размер TiC зерен имеет значение около $5 \mu\text{m}$, а средний размер зерен Al_2O_3 матрицы составляет 0.3–1.0 μm . Средняя длина нитевидных кристаллов SiC, использованных для армирования керамики, составляет 25 μm при диаметре около 0.5 μm .

Поля остаточных напряжений вводились в керамику в результате вдавливания по Виккерсу с использованием нагрузки 98 N. При этом индентирование производилось при различной взаимной ориентации индентора и образца. В результате для исследования могли быть выбраны области вдавливания с различной ориентацией радиальных

трещин относительно направления действия внешнего напряжения. Изображения исследуемого участка керамики получалось путем сканирования образца по двум координатам с шагом $2.5\ \mu\text{m}$. Для возбуждения температурных волн и акустических колебаний в образце использовалось излучение аргонового лазера ЛГН-503, модулированное акустооптическим модулятором МЛ-201. В ходе исследования сначала снималось фотоакустическое изображение участка керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$, индентированной по Виккерсу, при отсутствии внешней нагрузки. Затем снималось изображение того же участка при приложении к образцу заданной механической нагрузки. В результате в данной работе имелась возможность регистрировать изменения фотоакустического сигнала в различных зонах внутри областей вдавливания по Виккерсу.

На рис. 1 представлены типичные фотоакустические изображения для данной керамики, демонстрирующие характер их изменений под действием нагрузки. Видно, что эти изменения происходят в различных участках изображений, расположенных вблизи концов радиальных трещин, в зоне пластических деформаций, а также в зоне подповерхностных боковых трещин. Однако в данной работе основное внимание уделялось изучению поведения фотоакустических сигналов только вблизи концов радиальных трещин, так как для других участков структура зон пластической деформации и трещин является более сложной и нуждается в дополнительной идентификации. Из представленных изображений следует, что внешнее напряжение оказывает различное воздействие на поведение фотоакустических сигналов вблизи концов радиальных трещин, расположенных под разными углами к направлению действия внешнего напряжения.

Для объяснения представленных экспериментальных результатов воспользуемся теоретическими результатами, полученными нами ранее для выяснения природы фотоакустического эффекта в твердых телах с внутренними напряжениями, а также известными результатами из механики деформируемых твердых тел, касающихся поведения внутренних напряжений вблизи концов трещин. При этом учтем, что в наших экспериментах изображения формируются в относительно тонком приповерхностном слое. Так, для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ керамики при частоте модуляции $100\ \text{kHz}$ глубина проникновения тепловой волны в глубь объекта составляет около $10\ \mu\text{m}$. Кроме того, учтем, что вблизи концов радиальных трещин внутренние напряжения направлены

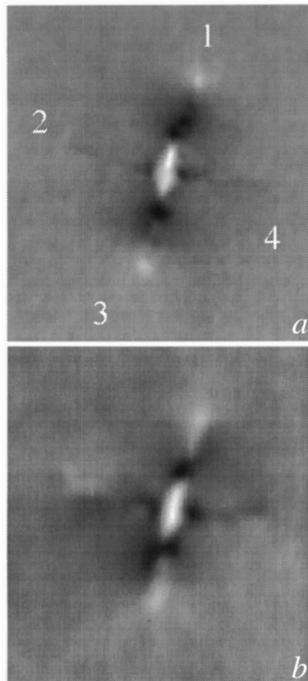


Рис. 1. Фотоакустическое изображение области керамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ вблизи места indentирования по Виккерсу. Площадь изображения $450 \times 500 \mu\text{m}$. Частота модуляции возбуждающего излучения 142 кГц. Цифрами отмечены номера трещин: *a* — образец в свободном состоянии, *b* — к образцу приложено сжимающее напряжение 170 МПа в направлении слева направо в плоскости изображения.

в основном вдоль поверхности объекта. В связи с этим в дальнейшем можно считать, что для тензора деформации, обусловленного наличием внутренних напряжений вблизи конца трещины, в зоне формирования фотоакустического сигнала соблюдаются условия $U_{xx}, U_{yy} \gg U_{zz}$ (ось z направлена по нормали к поверхности). В этом случае фотоакустический сигнал, обусловленный внутренними деформациями, в соответствии с результатами работ [14,15] может быть представлен в

линейном по U_{xx} , U_{yy} приближении

$$\Delta V(\omega) = A(U_{xx} + U_{yy}), \quad (1)$$

где $A = V_0(\omega)(\beta_0 + 3/2 - 3l')$, $V_0(\omega)$ — фотоакустический пьезоэлектрический сигнал от объекта при отсутствии начальных деформаций, $l' = \frac{l}{\rho_0 c_l^2}$, l — постоянная Мурнагана, ρ_0 — плотность тела в начальном состоянии, c_l — скорость продольного звука, β_0 — коэффициент, определяющий зависимость термоупругой энергии от начальной деформации [14,15].

Зоны пластических деформаций локализованы непосредственно вблизи концов радиальных трещин. Области, в которых распределены внутренние напряжения, захватывают значительно большие участки, находящиеся за пределами зон пластических деформаций. В этих областях остаточные деформации носят упругий характер и их можно считать связанными с внутренними напряжениями законом Гука. Тогда в соответствии с уравнением (1) связь фотоакустического сигнала с внутренними напряжениями должна определяться соотношением

$$\Delta V(\omega) = A'(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \quad (2)$$

где $A' = \frac{1-\nu}{E}A$, ν — коэффициент Пуассона, E — модуль упругости, σ_{xx} и σ_{yy} — компоненты тензора напряжений.

Из выражения (2) прежде всего следует, что зависимость фотоакустического сигнала от напряжений определяется теми же величинами, что и сигнала в случае SPATE¹ метода, который в соответствии с результатами работы [16] также пропорционален сумме $\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$. Однако если пространственное разрешение SPATE метода лежит в миллиметровом диапазоне, то фотоакустический метод способен обеспечивать микронное разрешение.

Ранее уже отмечалось, что в проведенных исследованиях за образование фотоакустического сигнала ответствен тонкий приповерхностный слой образца. В этом случае при определении внутренних напряжений вблизи концов радиальных трещин у поверхности образца приближенно их можно рассматривать как плоские. Тогда, воспользовавшись результатами для компонент тензора напряжения σ_{xx} и σ_{yy} для случая плоских

¹ Общепринятое в англоязычной литературе сокращение от Stress Pattern Analysis by measurement of Thermal Emission.

трещин [17], фотоакустический сигнал (2) вблизи концов трещин можно представить в виде

$$\Delta V(\omega) = A' \frac{2}{\sqrt{2\pi r}} \left[(K_I^{(0)} + K_I) \cos \frac{\theta}{2} - (K_{II}^{(0)} + K_{II}) \sin \frac{\theta}{2} \right], \quad (3)$$

где K_I и K_{II} — коэффициенты интенсивности напряжений относительно нормальной и касательной к берегам трещины составляющих внешней нагрузки, $K_I^{(0)}$ и $K_{II}^{(0)}$ — коэффициенты интенсивности напряжений трещины относительно внутренних напряжений, r — расстояние от конца трещины до точки наблюдения, θ — угол между направлением трещины и направлением на точку наблюдения.

Коэффициенты интенсивности напряжений для трещины, находящейся под воздействием внешней нагрузки, определяются величиной этой нагрузки и углом между трещиной и направлением действия нагрузки. Для случая плоских трещин такая связь определяется равенствами [17]

$$K_I = K_I^{(1)} \sin^2 \phi, \quad K_{II} = K_{II}^{(1)} \sin \phi \cos \phi, \quad (4)$$

где ϕ — угол между направлением трещины и направлением действия внешней нагрузки, $K_I^{(1)}$ и $K_{II}^{(1)}$ — значения коэффициентов интенсивности напряжений, характеризующие трещину и не зависящие от угла ϕ .

Таким образом, с учетом равенств (3) и (4) фотоакустический пьезоэлектрический сигнал вблизи конца трещины может быть описан с помощью выражения

$$\Delta V(\omega) = A' \frac{2}{\sqrt{2\pi r}} \times \left[(K_I^{(0)} + K_I^{(1)} \sin^2 \phi) \cos \frac{\theta}{2} - (K_{II}^{(0)} + K_{II}^{(1)} \sin \phi \cos \phi) \sin \frac{\theta}{2} \right]. \quad (5)$$

Для проверки приведенной модели формирования фотоакустического сигнала вблизи радиальных трещин было выполнено сравнение теоретических результатов, следующих из выражения (5), с экспериментальными данными, полученными из фотоакустических изображений мест индентации по Виккерсу в Al_2O_3 -SiC-TiC керамике. Для этого в данной работе было проанализировано поведение фотоакустических сигналов вблизи концов трещин вдоль направлений, проходящих перпендикулярно к направлению трещины. Выбор указанных

направлений определялся тем, что вдоль них распределение нормальных и касательных напряжений имеет существенно разный характер. Зависимости подобного рода были сняты для радиальных трещин, расположенных под разными углами по отношению к направлению действия внешней нагрузки, что позволяло сравнивать теоретические и экспериментальные результаты при различных условиях нагружения трещин.

На рис. 2 представлены результаты, отражающие поведение фотоакустического сигнала вдоль указанных направлений для двух трещин, а также соответствующие теоретические результаты, полученные с помощью выражения (5). Выбранные трещины соответствовали случаям, когда воздействие внешнего напряжения на них имеет существенно разный характер. Так, для трещины 1 угол $\phi \cong 75^\circ$ и внешняя нагрузка действует почти перпендикулярно к ее берегам. Для трещины 4 угол $\phi \cong 17^\circ$ и напряжения, обусловленные действием внешней нагрузки, являются в основном касательными по отношению к ней. В теоретических расчетах расстояние от конца трещины 1 до линии, вдоль которой снимался фотоакустический сигнал, принималось равным $5\mu\text{m}$, а для трещины 4 — равным $20\mu\text{m}$. Приведенные на рис. 2 результаты показывают, что зарегистрированный характер изменения фотоакустического сигнала вблизи концов трещин находится в хорошем качественном согласии с теоретическими результатами для обоих представленных случаев.

Полученные экспериментальные данные по поведению фотоакустического сигнала вблизи концов трещин, а также известные из теории трещин результаты позволяют сделать некоторые выводы относительно коэффициентов интенсивности напряжений для трещин в $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ керамике. Так, из теории трещин [18] известно, что в общем случае коэффициент интенсивности напряжений трещины при нагрузке вдавливания P может быть представлен в виде $K_I^{(0)} = \chi \frac{P}{L^{3/2}}$, где χ — безразмерный коэффициент, определяемый формой трещины, L — длина трещины. Аналогично коэффициент интенсивности напряжений трещины относительно прикладываемой к ней внешней нагрузки при $\phi = 90^\circ$ определяется выражением $K_I^{(1)} = \psi \sqrt{L}\sigma$, где ψ — другой безразмерный коэффициент, зависящий от формы трещины.

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, следует, что компенсация внутренних напряжений вблизи конца радиальной

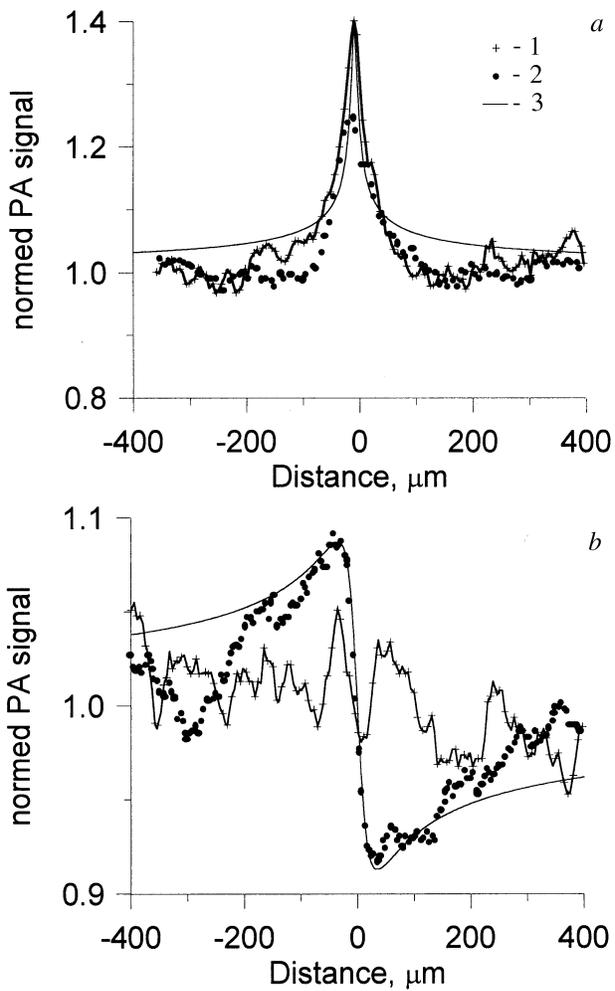


Рис. 2. Распределение фотоакустического сигнала вблизи конца трещины вдоль линии, перпендикулярной направлению трещины. Сигнал нормирован на среднее значение от образца: *a* — для трещины 1, *b* — для трещины 4. 1 — для свободного образца, 2 — для образца под нагрузкой, 3 — теоретическая кривая.

трещины I должна иметь место примерно при внешнем сжимающем напряжении 340 МПа. Длина радиальных трещин в $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-TiC}$ керамике при нагрузке вдавливания 98 Н составляла примерно $150\ \mu\text{m}$. Перечисленные данные позволяют связать коэффициенты χ и ψ друг с другом. Из них следует, что $\chi \cong 0.075\psi$. Отметим, что данная оценка находится в хорошем количественном согласии с аналогичным результатом, полученным в работе [19] для керамик с зёрнами Al_2O_3 . Кроме того, из полученных экспериментальных данных также следует, что $K_I^{(1)} \approx K_{II}^{(1)}$. Последний результат хорошо соответствует теории прямолинейных трещин в толстых пластинах [17], из которой следует точное равенство этих величин. В принципе подход, основанный на фотоакустическом методе, может позволить получать и значения самих коэффициентов интенсивности напряжений. Для этого необходимо наряду с изображениями зон вдавливания по Виккерсу так же детально исследовать характер изменения фотоакустического сигнала от однородных участков образца при изменении внешней нагрузки. Однако в рамках данной работы производилась регистрация только относительных значений фотоакустических сигналов. В связи с этим подобные исследования будут продолжены в дальнейшей работе.

Таким образом, фотоакустический пьезоэлектрический сигнал хорошо воспроизводит особенности изменений полей внутренних напряжений вблизи радиальных трещин под действием как нормальных, так и касательных внешних напряжений. В связи с этим появляется возможность использования фотоакустического пьезоэлектрического метода для изучения распределений внутренних напряжений вблизи приповерхностных трещин в керамиках. При этом результаты, получаемые с помощью фотоакустического метода при приложении внешней нагрузки к образцу, могут быть использованы для получения информации о коэффициентах интенсивности напряжений вблизи концов трещин.

В заключение авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за частичную поддержку данной работы в рамках проекта 01-01-00855 и U.S. Civillian Research and Development Foundation в рамках гранта PR1-2366-ST-02.

Список литературы

- [1] *Rosencwaig A.* // Progress in Photothermal and Photoacoustic Science and Technology. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1994. V. 2. P. 1–23.
- [2] *Cantrell J.H., Qian M., Ravichandran M.V., Knowles K.W.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 18. P. 1870–1872.
- [3] *Zhang H., Gissinger S., Weides G., Netzelmann U.* // J. de Physique. 1994. C7. V. 4. P. 603–606.
- [4] *Burbelo R.M., Zhabitenko M.K.* // Progress in Natural Science. London and Washington: Taylor&Francis, 1996. Suppl. V. 6. P. 720–723.
- [5] *Jiang F., Kojima S., Zhang B., Yin Q.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. Part 1. N5B. P. 3128–3131.
- [6] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е., Квай Г.Х.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 5. С. 44–52.
- [7] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 21. С. 40–48.
- [8] *Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E.* // Proc. of the 10th International Conference „Photoacoustic and Photothermal Phenomena“. 10 ICPPP. (AIP Conference Proceedings 463). Rome, Italy, 23–27 August 1998. P. 187–189.
- [9] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 8. С. 69–76.
- [10] *Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 5. P. 2948–2955.
- [11] *Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E.* // Proc. of the 4th International Congress on Thermal Stresses. Thermal Stresses'01. Osaka, Japan, 8–11 June 2001. P. 85–88.
- [12] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Николаев В.И., Роуз Д.Н., Думар Д.Е.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 12. С. 33–41.
- [13] *Cook R.F., Pharr G.M.* // J. Am. Ceram. Soc. 1990. V. 73. N 4. P. 787–817.
- [14] *Муратиков К.Л.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 13. С. 82–88.
- [15] *Муратиков К.Л.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 7. С. 59–63.
- [16] *Stanley P., Dulieu-Smith J.M.* // Exp. Techniques. 1996. V. 20. N 2. P. 21–23.
- [17] *Седов Л.М.* Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. 568 с.
- [18] *Smith S.M., Scattergood R.O.* // J. Am. Ceram. Soc. 1992. V. 75. N 2. P. 305–315.
- [19] *Braun L.M., Bennison S.J., Lawn B.R.* // J. Am. Ceram. Soc. 1992. V. 75. N 11. P. 3049–3057.