

05.1;08

Фотоакустический термоупругий эффект вблизи области индентации по Виккерсу в наноникеле

© К.Л. Муратиков, А.Л. Глазов, В.И. Николаев

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

Поступило в Редакцию 7 апреля 2005 г.

Исследован характер изменения фотоакустического сигнала в наноникеле вблизи мест индентации по Виккерсу. Получены фотоакустические изображения, отражающие особенности поведения фотоакустического сигнала внутри и вблизи зон индентации. Произведено сравнение характера изменения фотоакустического сигнала с имеющейся моделью его поведения вблизи зоны индентации, связывающей изменение фотоакустического сигнала с изменением коэффициента термоупругой связи материала образца под действием механических напряжений. Показано, что имеющаяся в настоящее время модель образования фотоакустического сигнала хорошо соответствует характеру изменения внутренних напряжений вблизи области индентации при отсутствии в образце дополнительных внутренних напряжений, обусловленных технологическими особенностями его приготовления.

Изучению фотоакустического (ФА) термоупругого эффекта в напряженных материалах в последнее время уделяется серьезное внимание [1–5]. К настоящему моменту в этой области получены важные результаты, касающиеся особенностей проявления ФА эффекта главным образом в напряженных хрупких материалах. Так, в работах [4,6–7] было исследовано поведение ФА сигнала вблизи концов радиальных трещин, образующихся в керамиках нитрида вблизи мест индентации по Виккерсу. В работах [8,9] аналогичные исследования были выполнены для композитных керамик на основе $Al_2O_3-SiC-TiC$. В указанных работах были зарегистрированы существенные аномалии в поведении ФА сигналов вблизи концов радиальных трещин, обусловленные концентрацией внутренних напряжений в этих областях. Следует отметить, что в работах [8,9] было дополнительно исследовано влияние внешних механических напряжений на ФА изображения зон индентации в керамиках. При этом экспериментально было подтверждено, что предложенная

в работе [10] теоретическая модель ФА эффекта достаточно хорошо описывает поведение ФА сигнала как относительно нормальных, так и касательных напряжений.

Существенно меньшее внимание уделялось изучению ФА эффекта в напряженных металлах. Так, в работе [1] была отмечена возможность регистрации ФА методом напряженного состояния алюминия, а в работе [11] были получены некоторые результаты, касающиеся влияния остаточных напряжений на ФА эффект в титане. Вместе с тем указанные исследования не носили систематического характера и перспективы использования ФА метода для регистрации механических напряжений в металлах до настоящего времени остаются недостаточно выясненными.

В связи с этим основной целью данной работы являлось дальнейшее исследование ФА эффекта в металлах с внутренними напряжениями. Для проведения экспериментальных исследований в данной работе были подготовлены образцы наноникеля (99.9%), изготовленные методом равноканального углового прессования по технологии, описанной в работе [12]. При этом размер зерна в них по данным электронно-микроскопических исследований не превышал 200 nm. Внутренние напряжения в исследуемые образцы вводились методом микроиндентирования по Виккерсу, который на сегодняшний день является одним из наиболее надежных и воспроизводимых методов введения в материалы пластических деформаций и внутренних напряжений [13].

В работе использовался образец наноникеля размером $4.8 \times 3.2 \times 2.9$ mm. На одну из его предварительно отполированных сторон были поставлены отпечатки по Виккерсу с нагрузкой 49 N. Отпечатки ставились с различной ориентацией сторон относительно образца. Пьезодатчик с резонансной частотой около 140 kHz подключался с тыльной стороны образца. Излучение возбуждающего лазера фокусировалось на поверхность образца в пятно размером около $1 \mu\text{m}$. ФА изображение объекта формировалось в результате перемещения образца по двум координатам с шагом $2.5 \mu\text{m}$. Одно из полученных ФА изображений участка образца вблизи места индентации по Виккерсу представлено на рис. 1. Из рис. 1 видно, что непосредственно внутри зоны воздействия индентора на образец имеют место достаточно сильные изменения ФА сигнала. Вместе с тем изменения ФА сигнала вблизи зоны индентации выражены значительно

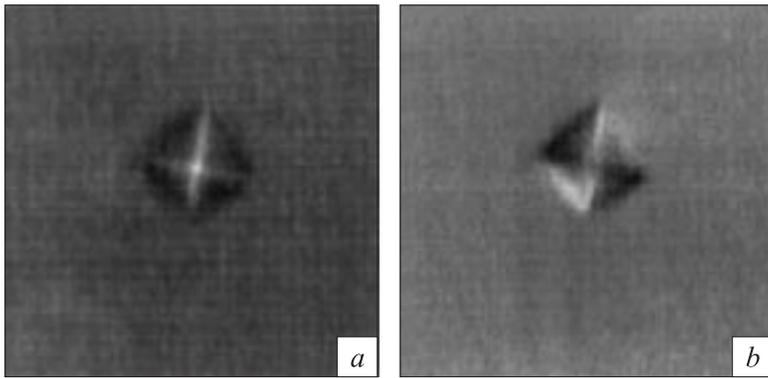


Рис. 1. Фотоакустическое изображение области наноникеля вблизи места индентирования по Виккерсу. *a* — амплитуда сигнала, *b* — фаза сигнала. Область сканирования 1×1 mm. Нагрузка на индентор — 49 N. Частота модуляции света — 142 kHz.

слабее. В данной работе основное внимание было уделено изучению характера изменения ФА сигнала вне зоны индентации.

В связи с тем что изменения ФА сигнала вне зоны индентации являются малыми, то для их описания можно воспользоваться результатами работы [14]. В этой работе в рамках теории возмущений были получены выражения для изменений ФА сигнала, связанных с влиянием упругих деформаций или внутренних напряжений на коэффициент термоупругой связи материала образца. В соответствии с результатами работы [14] ФА сигнал связан с изменением коэффициента термоупругой связи выражением

$$\Delta V_1 = C_1 \frac{1 + \sigma}{\pi E} \frac{1}{z^3} \int d^3 r' \gamma_1(r') \Delta T^{(0)}(r'), \quad (1)$$

где C_1 — некоторый коэффициент, зависящий от параметров пьезодатчика, σ — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, z — толщина образца, γ_1 — изменение коэффициента термоупругой связи образца в результате упругих деформаций или механических напряжений, $\Delta T^{(0)}$ — распределение температуры, создаваемое внутри исходного образца при воздействии на его поверхность излучения возбуждающего лазера.

Выражение (1) может быть использовано для определения влияния внутренних напряжений, возникающих в наноникеле вблизи мест индентации, на поведение ФА сигнала. Для решения этой задачи необходимо учесть следующие обстоятельства. Во-первых, в соответствии с результатами работ [8,9] изменения коэффициента термоупругой связи материала, обусловленные внутренними напряжениями, вблизи поверхности образца можно считать пропорциональными величине $\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$, где σ_{xx} и σ_{yy} — компоненты тензора внутренних напряжений (оси x и y лежат в плоскости поверхности образца). Во-вторых, при определении поведения ФА сигнала вне зоны индентации в первом приближении ее можно считать сферически симметричной [15]. В этом случае величина $\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$ вблизи поверхности образца будет пропорциональной компоненте тензора напряжений σ_r . Отметим, что в соответствии с результатами работы [15] компоненту тензора σ_r вне зоны индентации можно считать изменяющейся по закону

$$\sigma_r = -\frac{\sigma_r^{(0)} r_0^2}{r^2}, \quad (2)$$

где r_0 — размер области индентации, $\sigma_r^{(0)}$ — значение напряжения на границе области индентации.

На рис. 2 приведено распределение ФА сигнала вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр отпечатка по Виккерсу. Следует отметить, что для выбранного отпечатка изменение ФА сигнала вдоль других направлений также имело близкий характер. ФА изображение на рис. 1 было получено при частоте модуляции возбуждающего излучения 142 kHz. В этих условиях длина тепловой волны в образце существенно меньше, чем характерное расстояние, на котором изменяются внутренние напряжения. Поэтому в соответствии с выражением (1) ФА сигнал в такой ситуации должен повторять характер изменения внутренних напряжений. Из рис. 2 видно, что, несмотря на наличие у образца из наноникеля отдельных локальных неоднородностей, ФА сигнал в среднем достаточно хорошо соответствует характеру изменения внутренних напряжений вблизи места индентации.

По поводу представленных на рис. 1 и 2 результатов следует сделать важное замечание. Оно касается специального выбора нами для рассмотрения отпечатка по Виккерсу с симметричной структурой ФА изображения. Значительное число из полученных нами ФА изображений

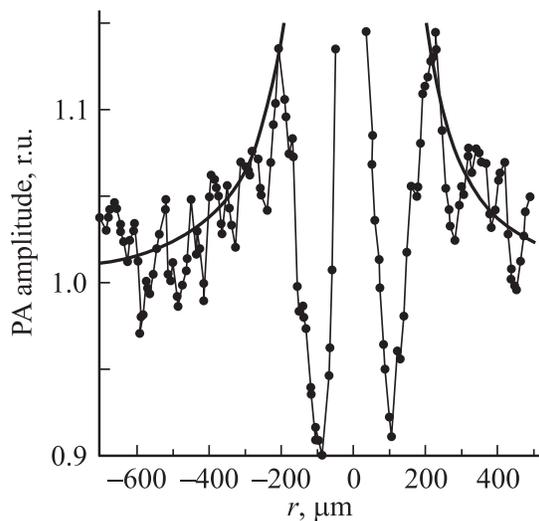


Рис. 2. Распределение амплитуды фотоакустического сигнала вдоль одной из линий, проходящих через центр отпечатка. Сплошные линии соответствуют изменению напряжения типа $1/r^2$, точки — данным эксперимента.

мест индентации в наноникеле не удовлетворяло этому условию. ФА изображения такого типа характеризовались достаточно сильно выраженной несимметричной структурой поведения ФА сигнала внутри зоны отпечатка. Подобная ситуация в поведении ФА сигнала вблизи зон индентации может объясняться одновременным действием в образце внутренних напряжений, обусловленных процессами индентирования, а также внутренних напряжений, вводимых в образец в ходе технологических операций по его изготовлению.

Возможность наличия в образце дополнительных внутренних напряжений, связанных с технологическими операциями по его изготовлению, не учитывалась в теоретической модели работы [15]. Закон изменения внутренних напряжений, даваемый выражением (2), связан только с процессом индентации образца. Вместе с тем в реальных образцах действуют также внутренние напряжения, введенные в них в процессе изготовления. Поэтому в общем случае закон изменения внутренних напряжений вблизи места индентации, даваемый выраже-

нием (2), может нарушаться. В этих условиях предложенная модель образования ФА сигнала нуждается в дальнейшем уточнении. Справедливость подобной картины подтверждается результатами наших более ранних исследований ФА эффекта вблизи мест индентации в керамиках. Так, в работах [8,9] было установлено, что внешние механические напряжения, прикладываемые вдоль поверхности образца, способны существенно изменить структуру ФА изображений мест индентации в керамиках. В частности, их наличие может приводить к существенному изменению поведения ФА сигнала вблизи отпечатков с изначально симметричной структурой ФА изображений. ФА изображения отпечатков такого типа в результате приложения внешних напряжений становились несимметричными. К сожалению, непосредственный учет дополнительных внутренних напряжений, связанных с технологией приготовления образца или обработкой его поверхности, в рамках модели работы [15] не представляется возможным. Этот случай нуждается в специальном исследовании, которое планируется в дальнейшем.

В заключение авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку данной работы в рамках проекта 04–02–17622.

Список литературы

- [1] *Kasai M., Sawada T.* // Photoacoustic and Photothermal Phenomena II. Springer Series in Optical Sciences. Springer-Verlag. 1990. V. 62. P. 33–36.
- [2] *Cantrell J.H., Qian M., Ravichandran M.V., Knowles K.W.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 18. P. 1870–1872.
- [3] *Burbelo R.M., Zhabitenko M.K.* // Progress in Natural Science. London and Washington: Taylor & Francis, 1996. Suppl. V. 6. P. 720–723.
- [4] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 5. С. 44–52.
- [5] *Jiang F., Kojima S., Zhang B., Yin Q.* // Jpn. Appl. Phys. 1998. V. 37. Part 1. N 5B. P. 3128–3131.
- [6] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 8. С. 69–76.
- [7] *Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 5. P. 2948–2955.
- [8] *Muratikov K.L., Glazov A.L., Rose D.N., Dumar J.E.* // High Temperatures–High Pressures. 2002. V. 34. P. 585–590.
- [9] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 8. С. 90–97.
- [10] *Муратиков К.Л.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 7. С. 59–63.

- [11] *Burbelo R.M., Zhabitenko M.K.* // Ukr. J. Phys. 2004. V. 49. N 2. P. 191–195.
- [12] *Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И.* // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1981. № 1. С. 115–123.
- [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. 2004. Т. 30. В. 22. С. 58–64.
- [15] *Yoffe E.H.* // Philosophical Magazine A. 1982. V. 46. N 4. P. 617–628.