

## УДАРНОЕ И «ПРОДОЛЖЕННОЕ» ПОВРЕЖДЕНИЕ КЕРАМИК ZnS и ZnSe

Кадомцев А.Г.<sup>1</sup>, Дунаев А.А.<sup>2</sup>, Кириенко М.Ф.<sup>1</sup>, Синани А.Б.<sup>1</sup>,  
Тихонова Л.В.<sup>1</sup>, Чмель А.Е.<sup>1</sup>, Щербаков И.П.<sup>1</sup>, Нарыкова М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический ин-т им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Государственный оптический ин-т им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Andrej.Kadomtsev@mail.ioffe.ru

Керамики ZnS и ZnSe применяется для изготовления фокусирующих элементов и защитных окон оптических устройств, устанавливаемых на летательных аппаратах, а также чувствительных устройств различных механических датчиков деформации. Поэтому в настоящей работе было проведено исследование инициации повреждений поверхности изделий из керамики ZnS и ZnSe при точечном силовом воздействии в различных временных режимах. При исследовании динамического нагружения высокопластичных керамик важную роль играет определение перехода от необратимой деформации к разрушению [1].

В настоящей работе тестировались названные керамики, полученные методом химического парового осаждения (chemical vapor deposition, CVD). Повреждение поверхности образцов, приготовленных в виде дисков, производилось либо ударом падающего груза на установленный на полированной поверхности заостренный боек, либо постепенным внедрением пирамиды Виккерса под нагрузкой 100 МПа либо 200 МПа. В обоих случаях записывались временные серии импульсов АЕ. Для регистрации АЕ на образце мастикой фиксировалась пластинка из высокочувствительной пьезокерамики  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ . При ударе продолжительность эмиссии звука не превышала 0.5 ms. Временная серия импульсов АЕ при внедрении индентера продолжалась до 100 ms. Сигналы акустической эмиссии подвергались низкочастотной цифровой дискриминации на уровне 100 kHz, чтобы отделить вклад паразитных колебаний элементов экспериментальной установки.

Временные развертки сигналов акустической эмиссии из разрушаемых образцов показаны на рис. 1а, б. Квадрат амплитуды ( $A^2$ ) в каждом импульсе пропорционален энергии ( $E$ ), выделенной при зарождении микротрещины,

На рис. 1 с, d показаны распределения импульсов АЕ в зависимости от энергии в импульсе (величина  $A^2$  пропорциональна выделенной звуковой энергии  $E$ ) в эксперименте с ударной нагрузкой. Распределения построены в виде зависимостей  $N(E>\varepsilon)$  от  $\varepsilon$ , где  $N$  – число импульсов, энергия которых  $E$  выше величины некоторого «порога»  $\varepsilon$ . Другими словами, параметр  $\varepsilon$  принимает последовательно значения энергии в зарегистрированных импульсах в интервале от 0 до 0.5 ms (горизонтальная координата), и число импульсов, энергия которых  $E$  превышает текущее значение  $\varepsilon$ , откладывается по вертикальной оси.

Одни и те же данные построены в двух координатах — линейных (рис. 1с) и полулогарифмических (рис. 2d). Можно видеть, что распределение, построенное в линейных координатах, представляют гладкую спадающую функцию, тогда как в полулогарифмических координатах экспериментальные точки укладываются на прямую с наклоном  $a$ :

$$\log_{10}N(E>\varepsilon) \propto -a\varepsilon. \quad (1)$$

Соотношение (1) эквивалентно экспоненциальному закону пуассоновского типа:

$$N(E>\varepsilon) \propto \exp(-a\varepsilon), \quad (1a)$$

который характерен для случайных событий, возникающих независимо друг от друга.

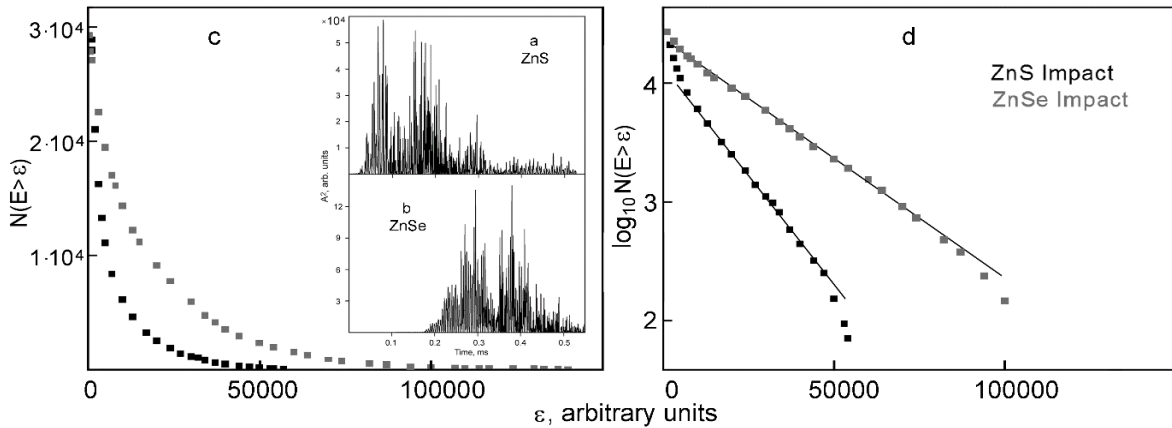


Рисунок 1 - Временные серии импульсов АЕ (квадрат амплитуды), возбужденные ударом в керамиках ZnS (a) и ZnSe (b); c, d – число импульсов, энергия которых превышает величину, указанную на соответствующей точке абсциссы; c – линейные координаты; d – полулогарифмические координаты (линейная шкала вдоль горизонтальной оси). Прямые линии на графиках (d) отвечают экспоненциальному закону (1a).

Временные серии АЕ, возбужденные внедрением пирамиды Виккерса (рис. 2), имели длительность, почти на три порядка величины превышающую время излучения звука при ударной нагрузке (рис. 1). Распределение энергии во временных сериях АЕ, возбужденных внедрением пирамиды Виккерса, показано на рис. 2 для двух приложенных нагрузок.

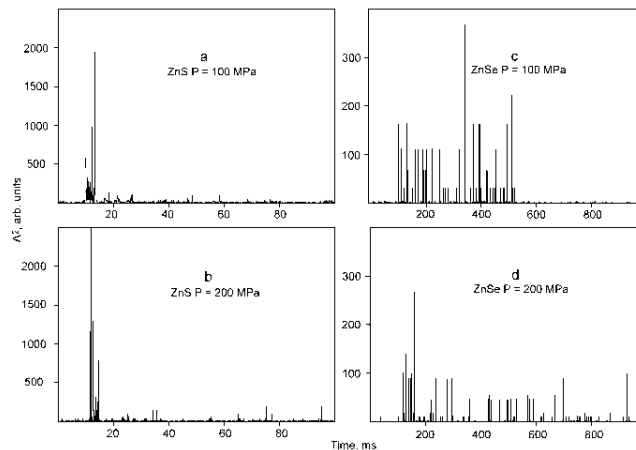


Рисунок 2 - Временные серии импульсов АЕ, возбужденные в керамиках ZnS (a, b) и ZnSe (c, d) при индентировании нагрузкой P = 100 МПа (a, c) и 200 МПа (b, d).

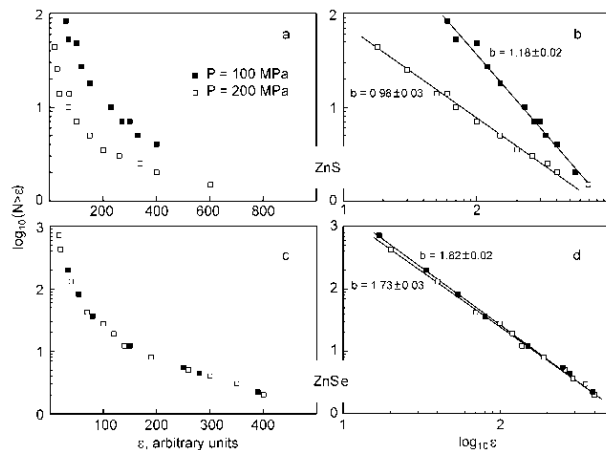


Рисунок 3 - Опыт с индентированием. Показано число импульсов, энергия которых превышает величину, указанную на соответствующей точке абсциссы; a, c – полулогарифмические координаты; b, d – двойные логарифмические координаты. Прямые линии на графике (b) отвечает степенному закону (2a).

Как и в случае ударной нагрузки, одни и те же экспериментальные распределения представлены в двух различных координатах. Однако в этом случае полулогарифмические координаты (рис. 2а, б) были дополнены двойными логарифмическими координатами (рис. 2с, d). Можно видеть, что распределения  $N(E>\varepsilon)$  versus  $\varepsilon$ , построенные в полулогарифмической шкале, не имеют log-линейных участков. Следовательно, процесс накопления повреждений не следует случайному (экспоненциальному) закону, как это имело место при ударном нагружении. При этом распределения представляют log-линейные зависимости в двойных логарифмических координатах:

$$\log_{10}(E>\varepsilon) \propto -b \log_{10}(\varepsilon), \quad (2)$$

причем наклон прямых  $b$  уменьшается при увеличении нагрузки на индентер.

Параметр  $b$  характеризует относительный вклад «больших» и «малых» событий в общее распределение энергий. Чем ниже  $b$ , тем больше крупных событий формирует распределение  $N(E>\varepsilon)$  versus  $\varepsilon$ . Например, на рис. 3б наклон прямых, отвечающих нагрузке 200 МПа, превышает таковой при 100 МПа, то есть увеличение давления индентера ведет к появлению более крупных трещин.

Освобождаясь от логарифмов в соотношении (2), получаем распределение энергий в импульсах АЕ в форме степенного закона:

$$N(E>\varepsilon) \propto \varepsilon^{-b}. \quad (2a)$$

В отличие от быстро спадающей экспоненциальной функции, степенной закон указывает на дальние взаимодействия между элементами структуры / событиями, что исключает случайное накопление дефектов.

Для объяснения очевидного различия микромеханических процессов при ударном или «продолжанном» нагружении образцов пирамидой Вика, следует принять во внимание поведение дислокаций в кристаллах пластичного материала при различных режимах нагружения. Кратковременный удар вызывает скольжение одиночных дислокаций без их эффективного взаимодействия. Напротив, при «продолженном» силовом воздействии со стороны индентера возникает кооперативное движение дислокаций как неравновесной диссипативной системы, и их самоорганизация в скопления [2]. Скопления и кластеры дислокаций представляют «слабые места» для зарождения трещин [3]. Таким образом, зависимость от режима нагружения степень дальнего действия в ансамбле дислокаций управляет характером накопления трещин (случайного или коррелированного).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00359 а).*

### Список литературы

- [1] Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Ляпунова Е.А., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. С. 32.
- [2] Малыгин Г.А. // УФН. 1999. Т. 169. С. 979–1010.
- [3] Тюлин Ю.И. // Дисс. д-ра техн. наук. Тамбов 2004.