

04,07

## Акустическая и электромагнитная эмиссии при ударном повреждении сверхтвердых керамик SiC и AlMg<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

© А.Г. Кадомцев<sup>1</sup>, Е.В. Гольева<sup>2,3</sup>, А.А. Дунаев<sup>2</sup>, А.Е. Чмель<sup>1</sup>, И.П. Щербаков<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 22 мая 2019 г.

В окончательной редакции 22 мая 2019 г.

Принята к публикации 23 мая 2019 г.

Сверхтвердые керамики SiC находят применение для изготовления индивидуальных средств защиты людей от точечных ударных воздействий, а прозрачные в широкой спектральной области керамики MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> — для защитных экранов оптических приборов летательных аппаратов, которые подвергаются ударам твердых пылевых частиц и атмосферных осадков. В настоящей работе исследован процесс зарождения и релаксации микротрещин при ударном воздействии методами акустической эмиссии и электромагнитной эмиссии соответственно. Поскольку механизм генерации указанных видов эмиссии имеет различное происхождение, то сопоставление эмиссионной активности того и другого вида позволило выявить общие и индивидуальные закономерности ударного повреждения твердых керамик SiC и MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

**Ключевые слова:** ударное разрушение, карбид кремния, алюмо-магниева шпинель, акустическая эмиссия, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48246.488

### 1. Введение

Твердые керамики используются для изготовления сосудов давления, клапанных седел, подложек для электронных блоков и многого другого. Для сверхтвердых керамик, таких как карбид кремния (SiC) и алюмо-магниева шпинель (АМШ, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), особый интерес представляет их использование в качестве легкой брони для высокоэффективной защиты людей и техники [1,2].

Несмотря на меньшую твердость керамической шпинели по сравнению с керамиками из диоксида кремния, ее привлекательными чертами являются высокая радиационная стойкость [3,4], прозрачность в видимой и средней ИК областях и отсутствие двулучепреломления благодаря кубической структуре [5]. Последнее обстоятельство открывает широкие области применения шпинели — от стекол для ручных часов и смартфонов до защитных экранов летательных аппаратов [6–8]. В последнем случае окна и обтекатели подвергаются ударам твердых пылевых частиц и атмосферных осадков, повреждающих поверхность изделий [9].

В настоящем сообщении повреждение керамик SiC и MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> производилось ударом заостренного бойка по полированной поверхности образца, то есть способ механического воздействия был связан с типичными приложениями этих керамик. При этом одновременно регистрировались два вида стимулированной эмиссионной активности — акустическая эмиссия (АЕ) и

электромагнитная эмиссия (ЭМЭ). Поскольку механизм генерации указанных видов эмиссии имеет различное происхождение, то сопоставление временных рядов излучения каждого вида позволило выявить общие и индивидуальные закономерности точечного повреждения твердых керамик SiC и MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

### 2. Образцы и оборудование

Исходное порошкообразное сырье MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> синтезировали соосаждением из сернокислых солей с последующим прокаливанием смешанной соли MgSO<sub>4</sub>·Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·25H<sub>2</sub>O при температуре 1300°C до образования АМШ. После высокотемпературного вакуумного прессования порошков плотность образцов достигала 99.6% от плотности монокристалла. Размер образующих керамику кристаллитов составлял 0.5–0.7 μm (рис. 1, а). Твердость по Виккерсу около 12 GPa.

Образцы керамик SiC получены спеканием ультрадисперсного порошка карбида кремния с размером частиц ~ 0.2 μm. При высоких температурах частицы спекались в зерна размером 2–6 μm, формируя материал с пористостью ~ 1% (рис. 1, б). Твердость по Виккерсу составляла 31 GPa.

Повреждение образцов, изготовленных в виде полированных дисков диаметром 20–30 mm и толщиной 1–2 mm, производилось ударом груза, падающего на

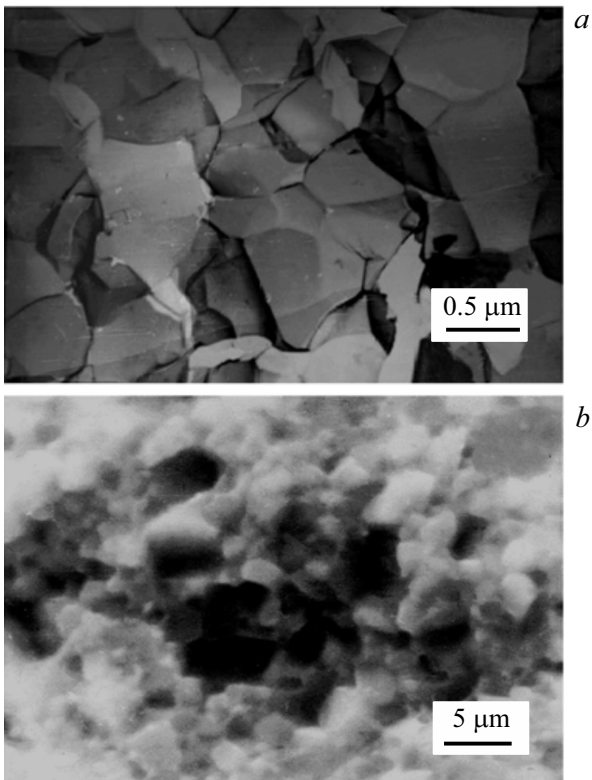


Рис. 1. Микрофотографии керамик  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  (a) и  $\text{SiC}$  (b).

стальной боек, поставленный на поверхность образца. ЭМЭ регистрировалась с помощью диполя Герца. Детектором АЭ в частотной области 100 kHz–1 MHz служила пластина из высокочувствительной пьезокерамики  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ . Сигналы ЭМЭ и АЭ поступали на вход аналогово-цифрового преобразователя АСК-3106 и в цифровой форме сохранялись в компьютере. Продолжительность сбора сигналов всех типов составляла 0.5 ms. Временное разрешение 10 ns.

### 3. Результаты

На рис. 2 показаны временные развертки ЭМЭ и АЭ, возбужденные точечным ударом в керамиках  $\text{SiC}$  и  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$ . Квадрат амплитуды ( $A^2$ ) в импульсах пропорционален энергии ( $E$ ), выделенной при зарождении (АЭ) и релаксации (ЭМЭ) микротрещины. Можно видеть, что генерация ЭМЭ происходит с некоторой задержкой относительно начала излучения звука, причем последовательность начала генерации особенно четко выражена в более крупнозернистой и более пористой керамике  $\text{SiC}$ .

На рис. 3 показаны распределения импульсов ЭМЭ в зависимости от энергии в импульсе построенные в виде зависимостей  $N(E > \epsilon)$  от  $\epsilon$ , где  $N$  — число импульсов, энергия которых  $E$  выше величины  $\epsilon$ , которая принимает последовательно значения энергии в импульсах, пришед-

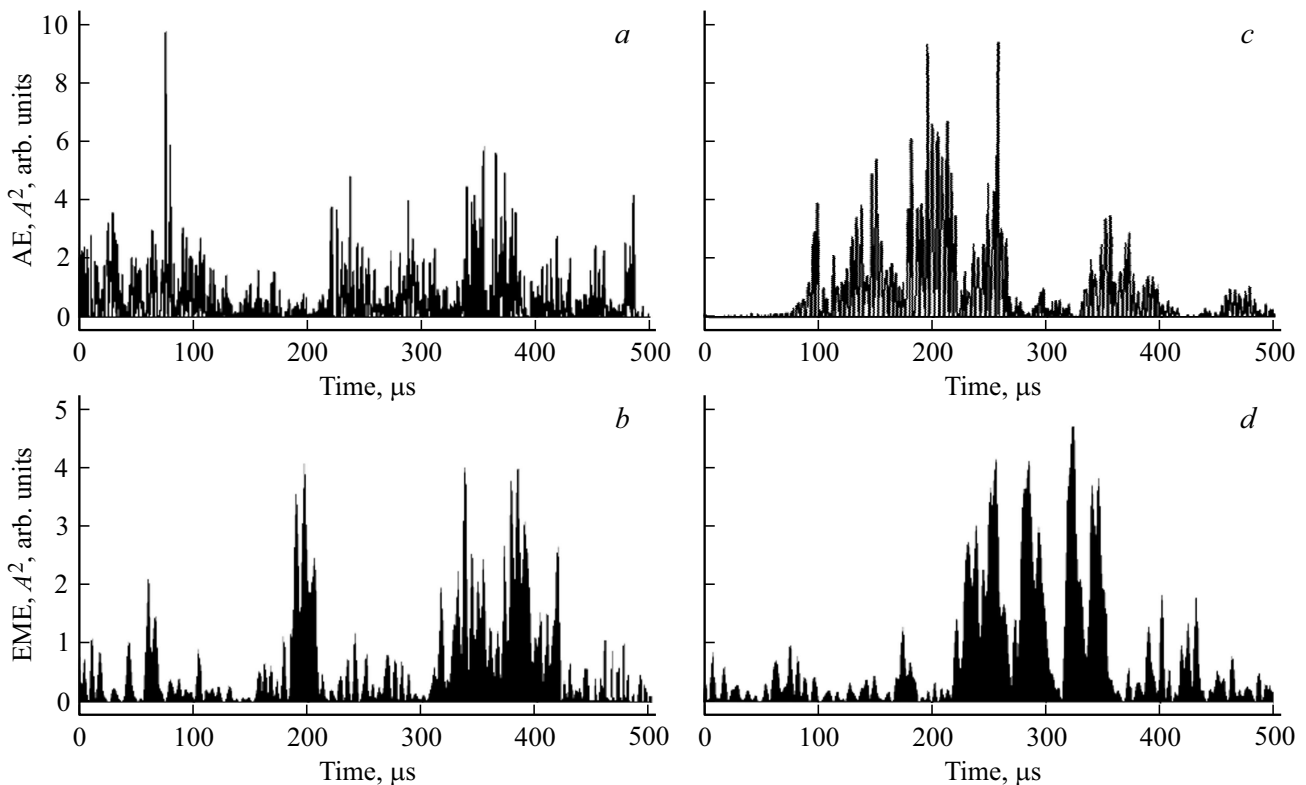
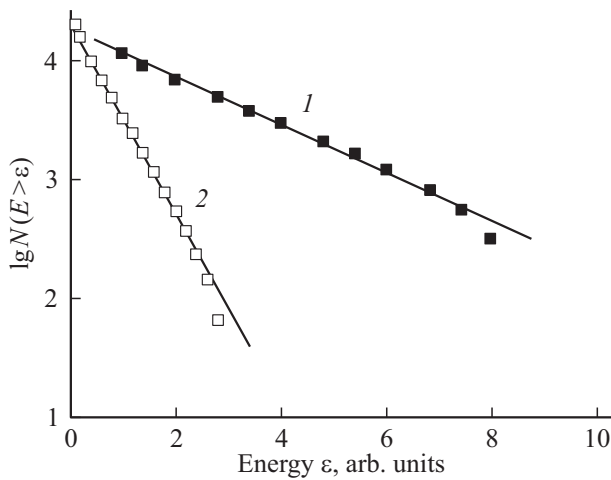


Рис. 2. Временные развертки АЭ (a, c) и ЭМЭ (b, d) из АМШ (a, b) и  $\text{SiC}$  (c, d), стимулированные ударной нагрузкой.



**Рис. 3.** Распределения энергии во временных рядах ЭМЭ из керамик АМШ (1) и SiC (2).

ших за время от 0 до 0.5 ms (горизонтальная координата), и число импульсов, энергия которых  $E$  превышает текущее значение  $\epsilon$ , откладывается по вертикальной оси.

Распределения построены в полулогарифмических координатах, в которых экспериментальные точки укладываются на прямую с наклоном  $a$ :

$$\lg N(E > \epsilon) \propto -a\epsilon \quad (1)$$

Соотношение (1) эквивалентно экспоненциальному закону Пуассоновского типа:

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

который характерен для случайных событий, возникающих независимо друг от друга. Наклон прямых характеризует относительный вклад „больших“ и „малых“ импульсов: чем ниже наклон  $a$ , тем больше в процессе разрушения происходило крупных событий. В частности, рис. 3 демонстрирует, что электромагнитные явления в

АМШ при ударе имели более высокую интенсивность, чем в карбиде кремния.

Рис. 4 представляет распределения  $N(E > \epsilon) \propto \epsilon$  для акустической активности. Одни и те же данные построены в полулогарифмических и двойных логарифмических координатах. В керамике  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  накопление дефектов, вызывающих АЭ, происходило случайным образом — прямые в полулогарифмических координатах, отвечающие соотношению (1a). Эмиссия АЭ из керамики SiC показывает в этих координатах нелинейную зависимость  $N(E > \epsilon) \propto \epsilon$ , но в двойных логарифмических координатах следует лог-линейному соотношению

$$\lg N(E > \epsilon) \propto -b \lg \epsilon, \quad (1)$$

что эквивалентно степенной функции

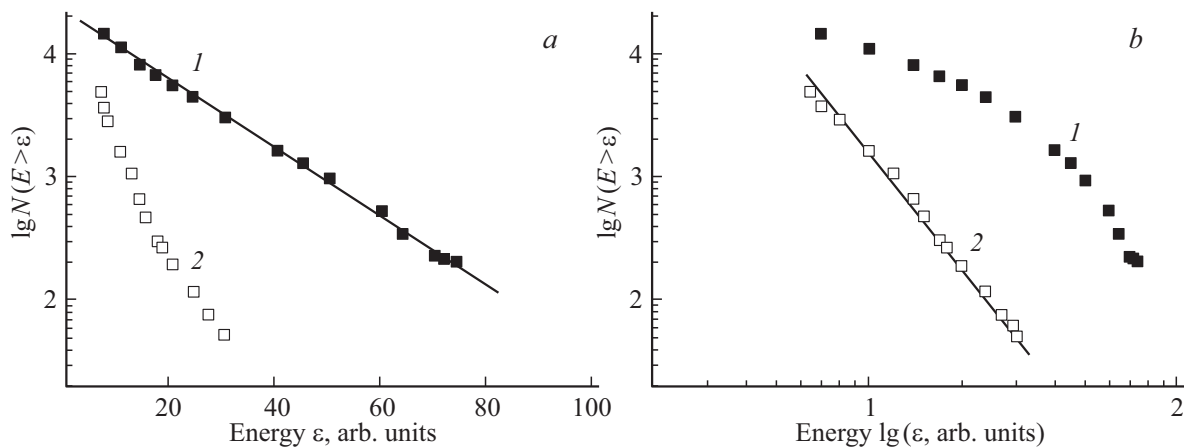
$$N(E > \epsilon) \propto \epsilon^{-b},$$

характерной для событий, между которыми имеется дальноедействие.

#### 4. Обсуждение

Рассмотрим механизмы генерации звука и ЭМЭ в хрупких твердых телах, и сопоставим их с физико-механическими характеристиками исследованных керамик. Формирования микротрещин, сопровождаемое ростом сигналов АЭ, начинается с момента касания бойком поверхности образца. При образовании микротрещин на их берегах возникают слои противоположных по знаку зарядов, которые аннигилируют с излучением сигнала ЭМЭ [10] при релаксации трещин после окончания действия ударной волны. Сочетание указанных эмиссионных механизмов проявляется в некоторой задержке начала ЭМЭ относительно АЭ, длительность которой зависит от физико-механических свойств материалов.

Как мы видели, распределение энергии в импульсах ЭМЭ из обеих керамик оказалось случайным. Это мож-



**Рис. 4.** Распределения энергии во временных рядах АЭ из керамик АМШ (1) и SiC (2). *a* — полулогарифмические координаты, *b* — двойные логарифмические координаты.

но объяснить тем, что аннигиляция зарядов на берегах трещин не вносит изменений в структуру материала. Исчезновение той или иной пары зарядов не влияет на стабильность других зарядов, которая определяется изменением геометрии трещины при ее релаксации.

В керамике SiC выделение акустической энергии при образовании трещин в SiC происходило по степенному закону. Медленно спадающая степенная функция отражает кооперативность процесса, то есть появление новой микротрещины влияет на вероятность зарождения соседней, изменяя таким образом механические свойства твердого тела.

Известно [11–13], что коррелированное формирование ансамбля микротрещин специфично для гетерогенных материалов, в которых макроскопическое повреждение предваряется накоплением микротрещин и их слиянием в очаг разрушения. В гомогенных материалах разрушение развивается как высоко-локализованный процесс без образования множества взаимодействующих микротрещин.

В то же время, керамика АМШ, будучи гетерогенным материалом (рис. 1, а), также показала случайное распределение энергии импульсов. Можно полагать, что причина в том, что этот материал имеет очень высокую плотность, близкую к плотности монокристалла. Соответственно, его механическое поведение в условиях данного эксперимента оказалось типичным для однородных твердых тел.

## 5. Заключение

Точечное ударное повреждение керамик SiC и  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  сопровождается акустической эмиссией из растущих микротрещин, а релаксация трещин после прохождения ударной волны — излучением электромагнитных волн. Активность ЭМЭ обусловлена тем, что на берегах возникающих трещин образуются противоположные по знаку заряды, которые аннигилируют при релаксации трещин.

Выделение акустической энергии при образовании трещин в керамике SiC происходило по степенному закону, поскольку накопление микротрещин в гетерогенных материалов имеет делокализованный характер, и появление нового дефекта влияет на вероятность зарождения соседнего, изменяя механические свойства твердого тела.

Распределение энергии АЭ в керамике  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  оказалось экспоненциальным. Как правило, распределения пуассоновского типа типичны для однородных твердых тел, в которых разрушение развивается в единственном очаге. Случайное распределение энергии АЭ в  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  объясняется очень высокой плотностью этой керамики, приближающейся к таковой в монокристалле. Также случайным оказалось распределение энергии в импульсах ЭМЭ из обоих материалов, что указывает на то, что

возникновение/гибель зарядов происходит независимо друг от друга.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 18-08-00359а).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Ю.В. Келина, В.В. Ленский, В.П. Параносенков, Л.А. Посьпкина. Огнеупоры и техн. керамика 1–2, 17 (2010).
- [2] J.M. Sands, C.G. Fountzoulas, G.A. Gilde, P.J. Patel. J. Eur. Ceram. Soc. **29**, 2, 261 (2009).
- [3] С.В. Габелков, Р.В. Тарасов, Н.С. Полтавцев, Ю.П. Кुरило, М.П. Старолат, Н.Ф. Андриевская, А.Г. Миронова, Е.Г. Дедовская, Л.М. Дитвиненко, Ф.В. Белкин. Неорг. материалы **43**, 4, 462 (2007).
- [4] F.A. Garner, G.W. Hollenberg, F.D. Hoobs, J.L. Ryan, Z. Li, C.A. Black, R.C. Bradt. J. Nucl. Mater. **212–215**, 1087 (1994).
- [5] M. Sokol, B. Ratzker, S. Kalabukhov, M.P. Dariel, E. Galun, N. Frage. Adv. Mater., Special Issue: Mater. Res. Israel, **30**, 41, 1706283 (2018).
- [6] J.L. Sepulveda, R.O. Loutfy, S. Chang, S. Ibrahim. Proc. SPIE, Wind. Dome Technol. Mater. XII. **8016**, 801604 (2011).
- [7] D.V. Tolstikova, E.V. Gol'eva, V.S. Lebanin. Opt. Zh, **81**, 12, 69 (2014).
- [8] E.V. Gol'eva, M.D. Mikhaïlov, A.A. Dunaev, B.A. Ignatenkov. J. Opt. Technol. **83**, 2, 127 (2016).
- [9] G.H. Jilbert, J.E. Field. Wear **243**, 1–2, 6 (2000).
- [10] K. Eftaxias, V.E. Panin, Ye. Deryugin. Tectonophys. **431**, 273 (2007).
- [11] A. Carpinteri. Int. J. Solid Struct. **31**, 291 (1994).
- [12] J. Weiss, M. Gay. J. Geophys. Res., **103B**, 24005 (1998).
- [13] D. Sornette. Proc. National Acad. Sci. USA **99**, Suppl 1 (2002) 2522.

Редактор К.В. Емцев