

05.1

## Временной паттерн накопления микротрещин при ударном повреждении пористой керамики SiC

© И.П. Щербаков, А.Г. Кадомцев, А.Е. Чмель

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

E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 января 2022 г.

В окончательной редакции 21 марта 2022 г.

Принято к публикации 20 апреля 2022 г.

Рассмотрены временные характеристики развития локального разрушения при кратковременной точечной нагрузке керамик SiC, широко применяемых в качестве защитных материалов против ударного воздействия на технику и человека. Методами акустической эмиссии и электромагнитной эмиссии изучена статистика соответственно зарождения и релаксации микротрещин. Показано, что длительность интервалов между появлением трещин следует степенному закону, характерному для кооперативных явлений. Временное распределение импульсов электромагнитного излучения от электрических зарядов, возникающих на берегах микротрещин и аннигилирующих при релаксации таковых после прохода ударной волны, напротив, было линейным. Временная структура релаксации трещин позволила выделить две группы повреждений различного масштаба: мельчайшие дефекты в сплошном материале и более крупные микротрещины, соединяющие соседние поры.

**Ключевые слова:** SiC, пористая керамика, ударное разрушение, акустическая эмиссия, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52614.19140

Механическое поведение пористых керамик существенно зависит от двух микроструктурных факторов, а именно от размера спеченных зерен и объема пор [1–3]. Соотношение этих параметров определяет гетерогенность керамики, от которой зависят процессы деформирования и разрушения материала (начиная от зарождения и роста первичных дефектов при внешнем силовом воздействии). В нагруженных гетерогенных материалах, для которых характерно большое количество условно „слабых“ мест, катастрофический распад предваряется накоплением множества микротрещин, которое переходит в стадию кластеризации, и далее потерей механической стабильности. Стадия накопления локальных дефектов может быть статистически охарактеризована выходом энергии при зарождении трещин, а также временными интервалами между ними. Временной аспект развития повреждения особенно интересен при ударной нагрузке керамики SiC, поскольку область ее применения [4] включает изделия защиты от ударного воздействия на человека и технику [5], а также броню композитного типа [6].

В настоящей работе представлены временные характеристики развития разрушения при ударном повреждении пористой керамики SiC, полученные методами акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитной эмиссии (ЭМЭ), позволяющими оценить статистику накопления и релаксации дефектов на микроструктурном уровне. При формировании микротрещин, зарождение и развитие которых проявляется в генерации импульсов АЭ, на противоположных берегах трещин образуются слои

противоположных электрических зарядов вследствие отколов, трения и скольжения стенок [7].

Релаксация трещин после прохождения ударной волны ведет к аннигиляции возникших зарядов с излучением электромагнитных сигналов [8]. В работе проанализированы распределения временных интервалов между импульсами в сериях АЭ и ЭМЭ (т.е. „времен ожидания“ появления следующего импульса) и выявлена структура „жизненных циклов“ микротрещин от их зарождения до коллапсирования.

Образцы были получены спеканием ультрадисперсного порошка SiC с размером частиц  $\sim 0.2 \mu\text{m}$ . Пористость керамик из карбида кремния можно варьировать добавлением некоторых спекающих добавок [9,10]. В нашем случае применялись концентрации добавок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (6.5 и 10.8 wt.%), В и С (2.5 и 6.8 wt.%), а температура спекания изменялась от 1920 до 2250°C. В результате были приготовлены керамики с пористостью ( $P$ ) 1% (образец SiC1) и 9% (SiC9).

Для испытаний образцы в виде пластин толщиной 1 mm помещались на массивную подставку, покрытую слоем консистентной смазки. Удар производился заостренным бойком из закаленной стали, на который падал груз 100 g с высоты 70 cm. Повреждения представляли собой маленькие кратеры диаметром до  $\sim 0.2 \text{mm}$ .

Для регистрации временных серий АЭ повреждения использовался широкополосный датчик из высокочувствительной керамики  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ , который крепился на образце вязким клеем. Сигнал ЭМЭ принимался диполем Герца. Эмиссионные сигналы обоих типов

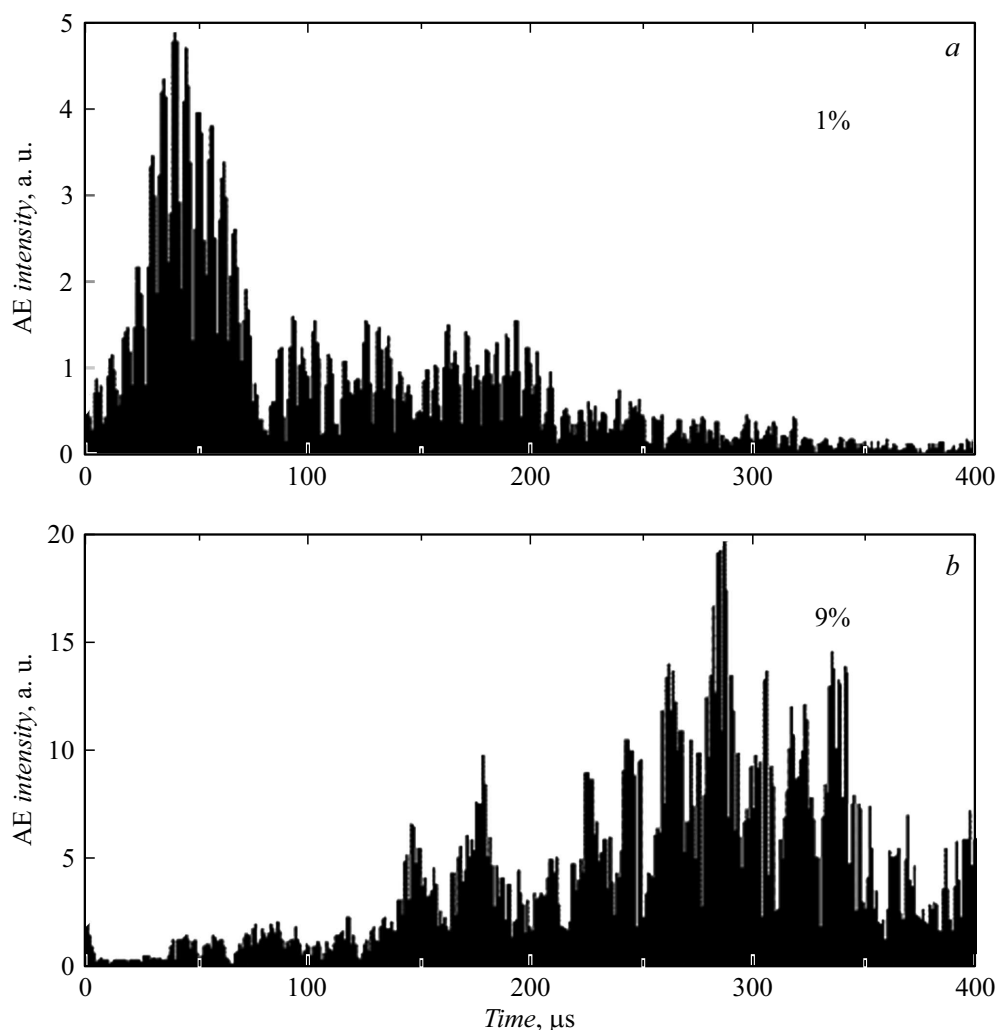


Рис. 1. Временные развертки импульсов АЭ, возбужденных ударной нагрузкой керамик SiC с пористостью 1 (а) и 9% (b).

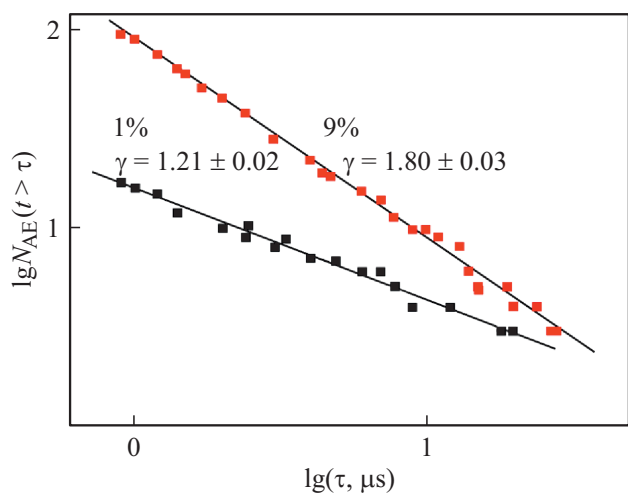


Рис. 2. Распределения временных интервалов между импульсами АЭ, возбужденными ударной нагрузкой в керамиках SiC с пористостью 1 и 9%.

передавались на аналого-цифровой конвертер и сохранялись в компьютере. Регистрация эмиссий включалась в момент контакта ударника с поверхностью образца: продолжительность временных серий составляла 1 мс. Предельная частота детектированных сигналов составляла 1 МГц. Для отсека вклада посторонних шумов от колебаний экспериментальной установки сигналы АЭ подвергались низкочастотной цифровой дискриминации на уровне 80 кГц.

Временные развертки амплитуд импульсов АЭ, генерированных ударом, показаны на рис. 1. Интервалы между импульсами (времена ожидания следующего импульса  $t$ ) измерялись с разрешением 10 нс. На рис. 2 приведены распределения времен ожидания при ударной нагрузке керамик SiC с пористостью 1 и 9%. Распределения построены в виде зависимостей  $N_{AE}(t > \tau)$  от  $\tau$ , где  $N$  (вертикальная координата) — число импульсов с временем ожидания  $t$ , превышающим величину  $\tau$ , которая принимает ряд значений зарегистрированных

Положение пиков активности акустических и электромагнитных эмиссий

Образец	Концентрация пор, %	Положение пика АЭ, $\mu\text{s}$	Положение пика ЭМЭ, $\mu\text{s}$
SiC1	1	40	500
SiC9	9	290	800–900

интервалов между импульсами (горизонтальная координата).

Можно видеть, что распределения, построенные в двойных логарифмических координатах, содержат логарифмические участки  $\log_{10} N_{\text{АЭ}}(t > \tau) \propto -\gamma \log_{10} \tau$ , которые представляют степенной закон

$$N_{\text{АЭ}}(t > \tau) \propto \tau^{-\gamma}. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  — наклон прямых отрезков, который зависит от вклада относительно „коротких“ и „длинных“ интервалов между импульсами АЭ: чем больше наклон, тем меньше продолжительных интервалов. Рис. 2 показывает, что в образце с большей пористостью интервалы между соседними импульсами сокращаются.

Функция  $N_{\text{АЭ}}(t)$  в уравнении (1) является единственным решением уравнения подобия

$$N(\lambda t) = \lambda^{-\gamma} N(t), \quad (2)$$

где  $\lambda$  — масштабный фактор. Самоподобная временная структура накопления микроповреждений возникает в результате „дальних“ взаимодействий между множеством отдельных разрывов сплошности, когда время затухания упругого возбуждения при образовании микротрещины длится дольше продолжительности ожидания появления следующей трещины.

Временные развертки активности ЭМЭ, возникающей при релаксации микротрещин, показаны на рис. 3 (на вставках). Из сравнения положений доминирующих пиков в развертках АЭ (рис. 1) и ЭМЭ видно заметное запаздывание начала временных серий ЭМЭ относительно АЭ (см. таблицу). Величина лага показывает время жизни открытых трещин.

Зависимости числа интервалов (и соответственно числа импульсов ЭМЭ)  $N_{\text{ЕМЭ}}(t > \tau)$  от  $\tau$  были линейными

$$N_{\text{ЕМЭ}}(t > \tau) \propto -\delta \tau, \quad (3)$$

состоящими каждая из двух отрезков с различными наклонами (рис. 3). Большая часть импульсов ЭМЭ возникала после интервалов продолжительностью менее  $1 \mu\text{s}$  (такие импульсы показали почти вертикальные графики), тогда как небольшое число более длинных импульсов после продолжительных интервалов (от 1 до  $8 \mu\text{s}$ ) легли на графики с малым наклоном. Распределения, состоящие из пар зависимостей  $N_{\text{ЕМЭ}}(t > \tau)$  от  $\delta \tau$  (рис. 3, *a* и *b*), свидетельствуют о наличии микротрещин двух типов, релаксирующих с различной

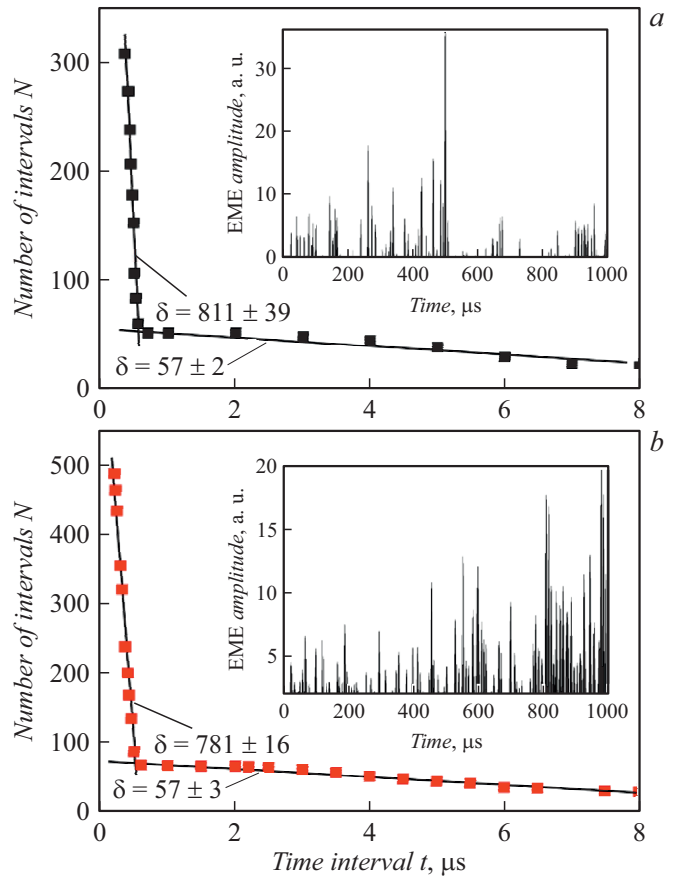


Рис. 3. Временные серии импульсов ЭМЭ, возбужденных ударной нагрузкой керамик SiC с пористостью 1 (*a*) и 9% (*b*) (на вставках), и соответствующие временные распределения интервалов между импульсами.

скоростью. Объяснение этого явления состоит в том, что ударное разрушение пористого материала происходит с генерацией как мельчайших, быстро ( $\sim 1 \mu\text{s}$ ) релаксирующих трещин в сплошном материале, так и более крупных, более стабильных (до  $8 \mu\text{s}$ ) трещин, соединяющих соседние поры.

Сравнение распределений интервалов между зарождениями микротрещин в ударно-нагруженном гетерогенном материале (керамике SiC) показало, что их накопление статистически коррелировано во времени: возникновение микротрещины влияет на время ожидания зарождения новой трещины (данные АЭ). Аннигиляция конкретного электрического заряда при коллапси-

ровании трещин после прохождения ударной волны не зависит от аннигиляции других зарядов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.I. Yun, S. Nahm, S.W. Park, *Ceram. Int.*, **48** (1), 1429 (2022). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.09.244
- [2] J. Wade, S. Ghosh, P. Claydon, H. Wu, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **35** (6), 1725 (2015). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.12.030
- [3] М.М. Давыдова, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк, *Физ. мезомеханика*, **18** (1), 100 (2015). [M.M. Davydova, S.V. Uvarov, O.B. Naimark, *Phys. Mesomech.*, **19** (1), 86 (2016). DOI: 10.1134/s1029959916010094].
- [4] J.H. Eom, Y.W. Kim, S. Raju, *J. Asian Ceram. Soc.*, **1** (3), 220 (2013). DOI: 10.1016/j.jascer.2013.07.003
- [5] J.L. Zinszner, P. Forquin, G. Rossiquet, *Int. J. Impact Eng.*, **76**, 9 (2015). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.007
- [6] D. Das, N. Kayal, *J. Mater. Sci. Res. Rev.*, **2** (2), 1 (2019).
- [7] D. Song, Q. You, E. Wang, X. Song, Z. Li, L. Qiu, S. Wang, *Geomech. Geoeng.*, **19** (1), 49 (2019). DOI: 10.12989/gae.2019.19.1.049
- [8] K. Eftaxias, V.E. Panin, Ye.Ye. Deryugin, *Tectonophysics*, **431** (1-4), 273 (2007). DOI: 10.1016/j.tecto.2006.05.041
- [9] H. Zhao, Z. Liu, Y. Yang, X. Liu, K. Zhang, Z. Li, *Trans. Nonferr. Met. Soc.*, **21** (6), 1329 (2011). DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60861-3
- [10] S.I. Yun, M.R. Youm, S. Nahm, S.W. Park, *Ceram. Int.*, **37** (9), 11979 (2021). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.040