

14,04

Дифференциация источников акустической эмиссии при ударном повреждении одноосно нагруженной кварцевой керамики

© И.П. Щербаков, А.Е. Чмель[†]

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

[†] E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 8 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 8 ноября 2023 г.

Принята к публикации 10 ноября 2023 г.

Одноосно сжатые образцы кварцевой керамики были подвергнуты точечному ударному повреждению, направленному ортогонально сжатию. Индуцированная ударом генерация акустической эмиссии регистрировалась в двух частотных диапазонах: 80–200 kHz и 300–500 kHz. Частота акустического импульса уменьшается с увеличением размера области излучения, а также с увеличением значений упругих характеристик его источника. Обнаружено, что распределения энергии во временных развертках акустической эмиссии, зарегистрированных в диапазоне 80–200 kHz, подчиняются степенному закону, характерному для процесса кооперативного образования микротрещин, тогда как распределения в диапазоне 300–500 kHz описываются экспоненциальной функцией, типичной для случайных, не взаимодействующих источников акустической эмиссии, таких как деформация зерен керамики. При компрессии, близкой к пределу прочности, ударное воздействие вызывало „допороговое“ макроразрушение образцов (триггерный эффект).

Ключевые слова: керамика, SiO₂, ударное разрушение, акустическая эмиссия.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56951.248

1. Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на чувствительности к упругим волнам, возникающим в микромеханических актах, индуцированных в твердом теле, широко применяется для мониторинга поведения различных гетерогенных материалов, испытывающих механическую нагрузку — цементный камень [1,2], горные породы [3,4], керамики [5,6]. В настоящей работе модельным гетерогенным материалом для исследования особенностей отклика АЭ на ударное воздействие служила коммерческая кварцевая керамика керсил [7], близкая по механическим параметрам зарубежному аналогу Corning 7941. Привлекательным свойством этой керамики для воспроизводимых механических испытаний, которым не обладают строительные материалы и горные породы, является однокомпонентный состав.

В лабораторных исследованиях генерация АЭ может вызываться одноосным [8] или трехосным [4] сжатием, а также ударной [9], сдвиговой [10] или комбинированной (сдвиг с компрессией) [11] нагрузками на образцы. В настоящей работе было применено сочетание статической вертикальной нагрузки с ортогонально направленным точечным ударом, который производил повреждение на боковой поверхности образца. Такая геометрия нагружения имитировала реальное распределение механических сил в строительных сооружениях и природных объектах, нижние элементы которых сжаты в вертикальном направлении, а на боковые поверхности действуют распространяющиеся сейсмические волны, приливы, вул-

каническая активность и некоторые крупномасштабные инженерные процедуры.

Кроме задания геометрии нагружения образцов необходимо было выбрать частотную область регистрации АЭ. Частота акустического импульса увеличивается с уменьшением области излучения, скажем, размера возникшей микротрещины. Применение резонансных датчиков позволяет улавливать более слабые сигналы, но лишь в узком размерном диапазоне. Широкополосные датчики охватывают фактически весь набор образующихся дефектов, но их чувствительность намного ниже.

С целью дифференцировать источники упругих волн различного масштаба информация с широкополосного датчика была проанализирована в двух частотных диапазонах: 80–200 kHz и 300–500 kHz. Таким образом удалось провести сравнение выделенной энергии при производимых локальным ударом микроповреждениях в разнесенных энергетических диапазонах АЭ. Статистический анализ временных серий АЭ показал качественное различие источников эмиссии в указанных частотных зонах.

2. Образцы и оборудование

Керамику керсил получают водным шликерным методом суспензии мелкодисперсного плавленного кварца с последующей выдержкой „сырого“ материала (заготовки) при комнатной температуре, сушкой и прокаливанием. Керсил имеет плотность 2 g/cm³, открытую пористость ~ 10%, содержание групп OH⁻ ~ 10³ ppm.



Рис. 1. Общий вид установки для анализа характеристик генерации АЭ при ударном повреждении одноосно сжатого образца; на вставке — узел сжимающей и ударной нагрузок.

Фотография установки для нагружения образцов показана на рис. 1. Повреждение поверхности образца создавалось заостренным бойком, закрепленным на маятниковом копре. Ударная волна в одноосно сжатом образце возбуждалась ортогонально статической нагруз-

ке. Позади образца помещалась опорная пластина для исключения его горизонтально смещения при ударе.

Энергия бойка была постоянной, равной 0.12 J. Предварительно была измерена предельная (пороговая) нагрузка на сжатие (без ударной нагрузки) P_{ul} . Текущая нагрузка P изменялась ступенчато от 0 до критической величины, при которой при ударе происходило разрушение образца (фрагментация). После каждого удара временные развертки АЭ регистрировались широкополосным пьезодатчиком из высокочувствительной керамики PZT, установленным на боковой поверхности образца. Пьезоэлектрический коэффициент материала датчика превышал на два порядка величины таковой кварца, что минимизировало вклад в полезный сигнал АЭ со стороны исследуемой керамики. Развертка сигналов АЭ производилась в течение 4 ms с временным разрешением 40 ns.

3. Результаты

3.1. Чисто ударное воздействие

Первые эксперименты были проведены без одноосного статического давления, то есть только ударом бойка. Стимулированная активность АЭ из поврежденной поверхностной области регистрировалась в диапазонах 80–200 kHz и 300–500 kHz. Выход энергии E при образовании точечного дефекта пропорционален квадрату амплитуды акустических импульсов: $E \propto A^2$. На рис. 2 показаны временные серии величин A^2 зафиксированные в указанных выше диапазонах частот.

На рис. 3 показаны распределения энергии во временных сериях АЭ в низкочастотной и высокочастотной областях. Распределения приведены в форме зависимостей $N(E > \epsilon)$ versus ϵ , в которых по оси ординат отложено число импульсов N , энергия которых E превышает отложенный по оси абсцисс „порог“ ϵ , пробегающий значения энергии импульсов, зарегистрированные во временном интервале 0–4 ms после удара.

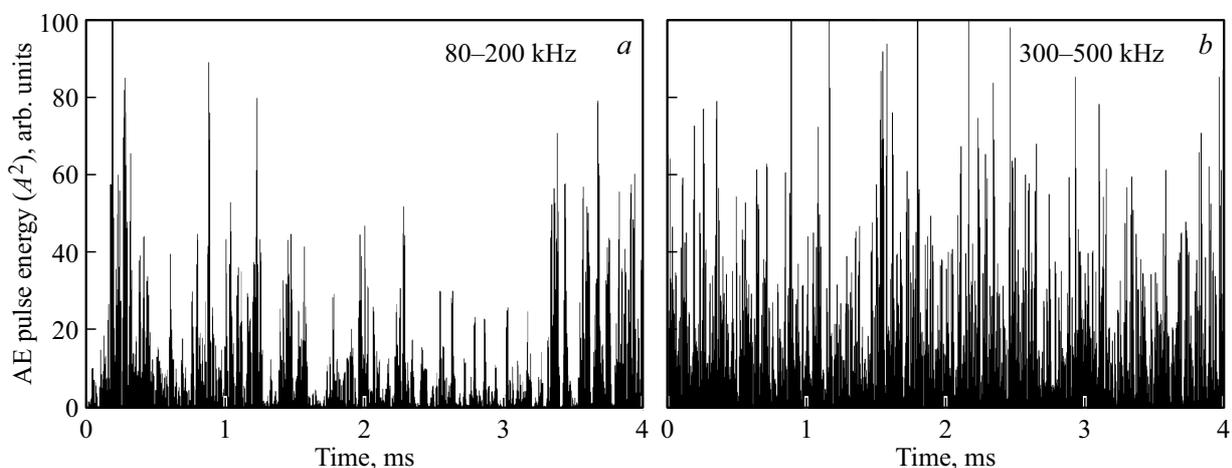


Рис. 2. Временные развертки амплитуд АЭ в диапазонах 80–200 kHz (a) и 300–500 kHz (b), зарегистрированные после ударного воздействия на образец, свободный от статической нагрузки.

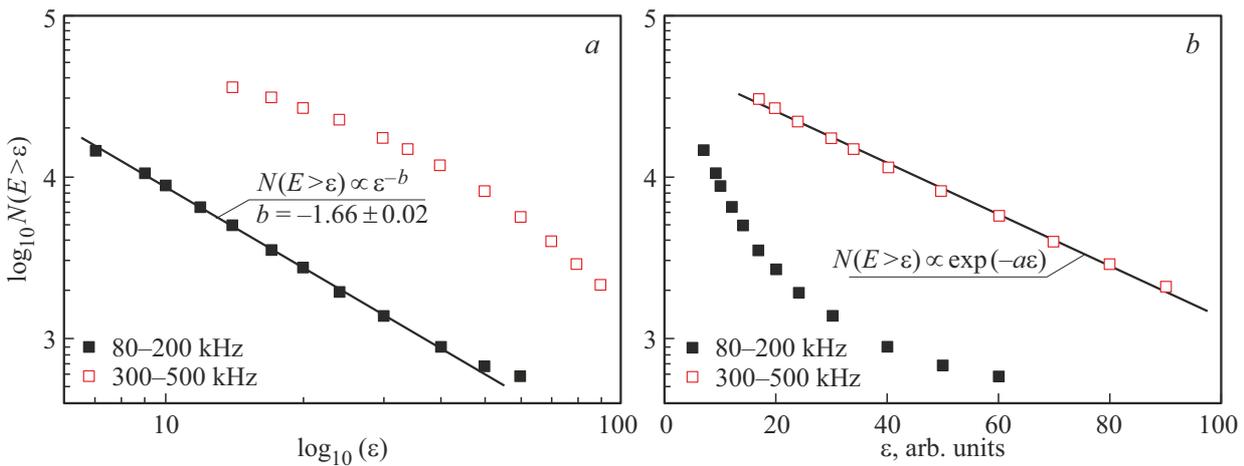


Рис. 3. Распределения энергии во временных сериях АЭ в частотных диапазонах 80–200 kHz и 300–500 kHz после ударного воздействия на образец, свободный от статической нагрузки, в двойном логарифмическом (а) и полулогарифмическом (b) масштабах.

Одни и те же экспериментальные данные приведены в двойном логарифмическом (на рис. 3, а) и в полулогарифмическом (на рис. 3, b) масштабах. Можно видеть, что распределение $N(E > \epsilon)$ в зависимости от ϵ данных АЭ, собранных в окне 80–200 kHz, в двойных логарифмических координатах представляет лог-линейную зависимость

$$\log_{10} N(E > \epsilon) \propto -b \log_{10}(\epsilon), \quad (1)$$

где b — наклон прямого отрезка.

Освобождаясь от логарифмов, получаем распределение $N(E > \epsilon)$ в зависимости от ϵ в степенной форме

$$N(E > \epsilon) \propto \epsilon^{-b}. \quad (1a)$$

Степенная функция является единственным решением уравнения самоподобия

$$N(\lambda E) = \lambda^{-b} N(E), \quad (2)$$

где λ — масштабный фактор. Масштабная инвариантность процесса накопления микродефектов возникает в результате „дальних“ взаимодействий между отдельными событиями локального разрушения, которые взаимодействуют друг с другом на расстояниях, превышающих геометрический размер поврежденной области материала [12].

Распределение энергии в окне 300–500 kHz не проявило лог-линейной зависимости (1). Однако в полулогарифмических координатах (рис. 3, b) экспериментальные точки ложатся на прямую с наклоном a в соответствии с соотношением

$$\log_{10} N(E > \epsilon) \propto -a\epsilon, \quad (3)$$

которое может быть представлено в экспоненциальной форме

$$N(E > \epsilon) \propto e^{-a\epsilon}. \quad (3a)$$

Функция распределения пуассоновского типа является характерной чертой случайных событий, не взаимодействующих между собой.

3.2. Образцы под статическим давлением

При проведении экспериментов с ударным повреждением керамики, находящейся под действием ортогонально приложенного статического сжатия, образцы помещались под гидравлический пресс, который последовательно создавал нагрузки с относительными давлениями P/P_{ul} 0,3, 0,6, 0,9, при которых удар бойка не вызывал глобального разрушения. Однако при величине статического давления в пределах $0.9P_{ul} < P < P_{ul}$ при ударном воздействии возникало глобальное разрушение образца, которое можно определить как „допороговое“. На рис. 4 приведены временные развертки генерированных импульсов АЭ в низкочастотном окне 80–200 kHz, в том числе укороченная развертка (рис. 4, d), которая была зарегистрирована при ударном разрушении образца под нагрузкой $P = 0.93P_{ul}$.

На рис. 5 приведены распределения энергии в сериях импульсов АЭ. Наклон прямых b проявил тенденцию к снижению по мере увеличения статической нагрузки. Обращает на себя внимание очень низкий наклон графика при „допороговом“ разрушении ($P = 0.93P_{ul}$) по сравнению с таковыми при статической нагрузке от нулевой до $P = 0.9P_{ul}$. Наклон зависимости (1) отражает относительный вклад в АЭ импульсов с малой и высокой энергией [13]: чем меньше наклон, тем больше более крупных повреждений создает удар бойка.

4. Обсуждение

Возбужденная точечным ударом активность АЭ наблюдалась при статическом одноосном сжатии от ну-

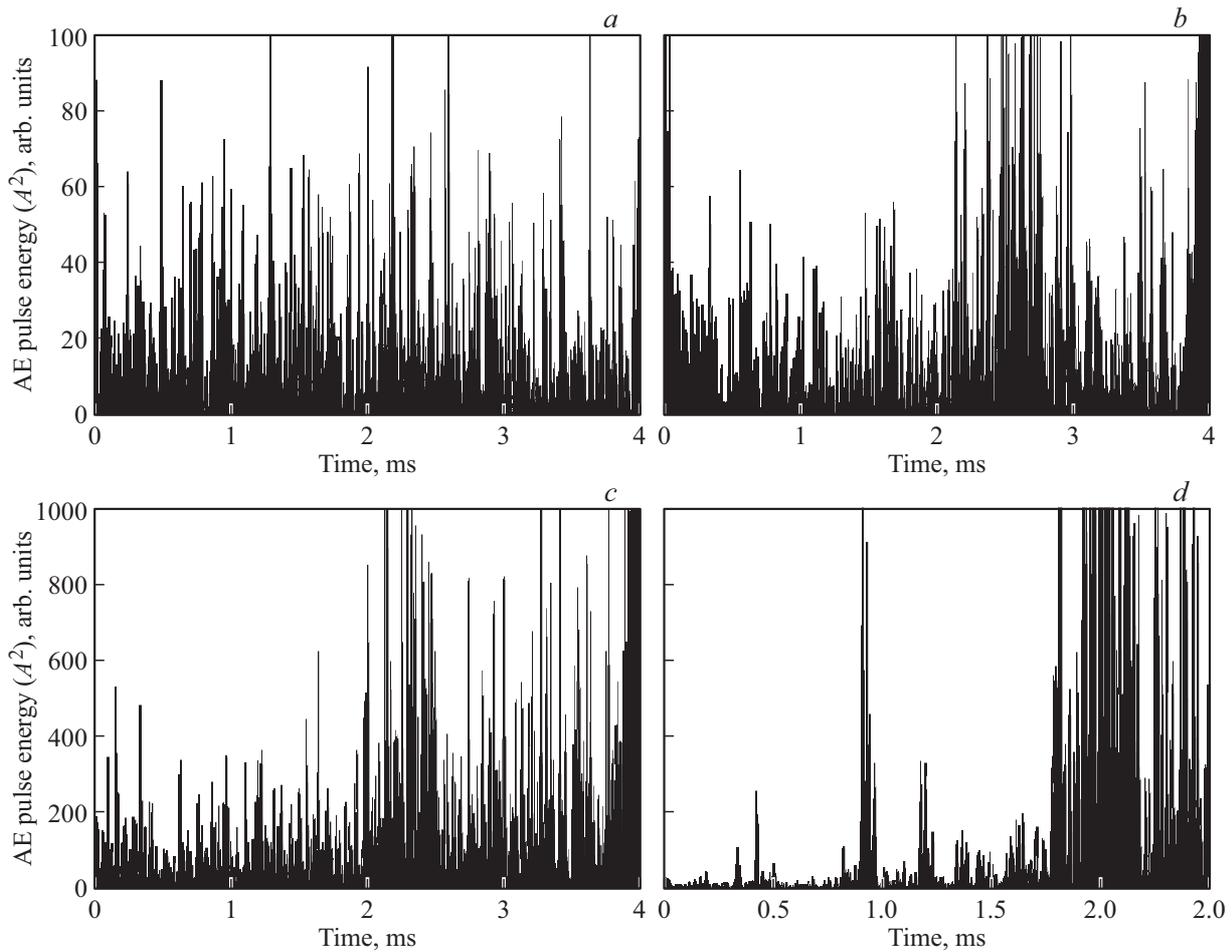


Рис. 4. Индуцированные ударом временные развертки АЭ в диапазоне 80–200 kHz при величинах компрессии $0.3P_{ul}$ (a); $0.6P_{ul}$ (b), $0.9P_{ul}$ (c) и $0.93P_{ul}$ (d).

левого до близкого к порогу разрушения (но еще до критического) значения. Применение широкополосного приемника сигналов АЭ позволило выделить два различных источника эмиссии в диапазонах 80–200 kHz и

300–500 kHz. Степенной закон распределения энергии, наблюдавшийся в низкочастотном окне, характерен для кооперативного накопления повреждений благодаря взаимодействию между зарождающимися микротрещинами. Частота импульса АЭ обратно пропорциональна размеру повреждения. Поэтому акустическая генерация в высокочастотном окне вызвана образованием более ограниченных дефектов — таких как локальная пластическая деформация перемычек между порами или/и смещением пор с излучением акустических волн. Случайный характер распределений энергии импульсов, зарегистрированных в окне 300–500 kHz, показал, что их источники принадлежат к микромеханическим явлениям, не влияющим друг на друга из-за недостаточной энергии их взаимодействия на расстоянии.

Накопление микротрещин, проявившееся в области 80–200 kHz, характеризуется величиной b в уравнении (1), впервые введенной в законе Гутенберга–Рихтера. Изменение этого параметра при различных условиях статического нагружения показано на гистограмме (рис. 6). Можно видеть, что минимальное сжатие образца до $0.3P/P_{ul}$ привело к заметному увеличению

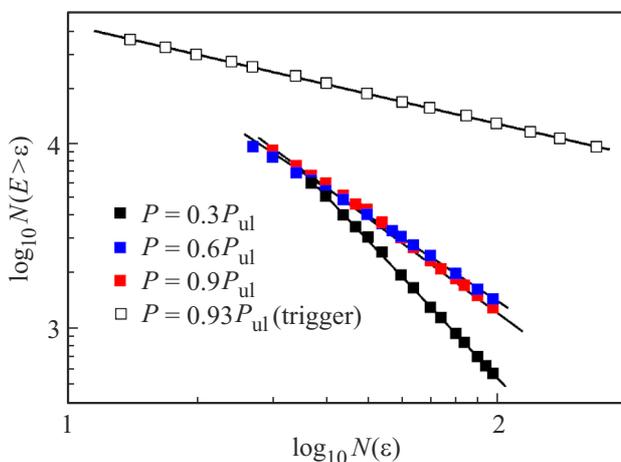


Рис. 5. Распределения энергии в сериях импульсов АЭ при сжимающих напряжениях от $P = 0.3P_{ul}$ до $P = 0.93P_{ul}$.

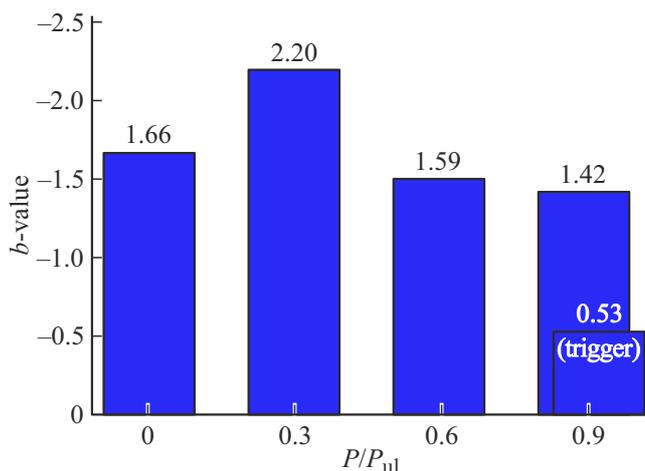


Рис. 6. Гистограмма изменения параметра b в зависимости от степени статического сжатия образца.

величины b , что, как говорилось выше, указывает на уменьшение вклада более крупных актов АЭ в распределение энергии. Это можно объяснить первичным увеличением плотности материала. По мере увеличения сжимающей нагрузки до $0.6 P/P_{ul}$ и далее до $0.9 P/P_{ul}$, параметр b вновь уменьшился, отражая относительное увеличение энергии возникновения новых микротрещин. В диапазоне нагрузок $0.9 < P/P_{ul} < P_{ul}$ возникал триггерный эффект — „допороговое“ глобальное разрушение материала (фрагментация). В последнем случае величина b падала в несколько раз, что и следовало ожидать при образовании крупных трещин. Этот результат совпадает с данными [3], где отмечалось, что при возникновении триггерного эффекта в граните величина b была ниже, чем при стандартном разрушении при пороговой нагрузке.

5. Заключение

Генерация сигналов АЭ при ударном повреждении лабораторных образцов кварцевой керамики, находящихся под сжимающим давлением, регистрировалась в областях 80–200 kHz и 300–500 kHz. Сравнительный статистический анализ распределений энергии в развертках АЭ показал различие процессов разрушения структуры материала, нашедших отражение в АЭ в указанных частотных диапазонах. В более низкочастотном диапазоне распределение энергии в импульсах АЭ следовало степенному закону, характерному для масштабно-инвариантного накопления микротрещин, тогда как эмиссия в более высокочастотной области описывалась экспоненциальной функцией, типичной для случайных статистических процессов. К таковым в данном случае можно отнести деформационные смещения в перемычках между порами, которые (в отличие от трещин) не проявляют взаимодействия между собой из-за недостаточной энергии таких структурных изменений.

Построенные распределения энергии импульсов, эмитированных в низкочастотном диапазоне, были охарактеризованы величиной параметра b , широко используемого в сейсмологии для оценки числа событий с различным выходом энергии. Статическое нагружение вызвало увеличение относительного вклада мелких микротрещин, но при триггерном разрыве наблюдалось резкое увеличение доли актов повреждения с высоким выходом энергии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.G. Aggelis. *Mech. Res. Commun.* **38**, 153 (2013).
- [2] D.D. Mandal, M. Bentahar, A. El Mahi, A. Brouste, R. El Guerjouma, S. Montresor, F.B. Cartiaux. *Materials* **15**, 3486 (2022).
- [3] J. Davidsen, T. Goebel, G. Kwiatak, S. Stanchits, J. Baró, G.J. Dresen. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **126**, e2021JB022539 (2021).
- [4] B. Haimson, C. Chang. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* **37**, 285 (2000).
- [5] J. Aué, J.T.M.D. Hosson. *J. Mater. Sci.* **33**, 5455 (1998).
- [6] G. Ojard, M. Mordasky, R. Kumar. *AIP Conf. Proc.* **1949**, 230028 (2018).
- [7] В.В. Викулин, И.Л. Шкарупа, С.М. Иткин, Ф.Я. Бородай. Патент РФ RU2385850 (2008).
- [8] C.H. Sondergeld, L.H. Estey. *Geophys. Res. Solid Earth* **86**, 2915 (1981).
- [9] X. Liu, M. Pan, X. Li, J. Wang. *Advances in Acoustic Emission Technology: Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission — 2015*. Springer Proceedings in Physics **179**, 135 (2015).
- [10] X. Lei. *Appl. Sci.* **9**, 2498 (2019).
- [11] Y. Cao, J. Xu, L. Chen, P. Wu, F. Shaikh. *Sci. Rep.* **10**, 22051 (2020).
- [12] D.D. Bowman, G. Ouillon, C.G. Sammis, A. Sornette, D. Sornette. *J. Geophys. Res.* **103**, 24359 (1998).
- [13] P. Li, M. Cai, Q. Guo, F. Ren. *Lithosphere, Special* **11**, 3594940 (2022).

Редактор Е.Ю. Флегонтова