04,14

Акустическая и электромагнитная активность при ударном разрушения поверхности сухого и влажного цементного камня

© А.Г. Кадомцев, 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 12 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 12 декабря 2025 г.
Принята к публикации 13 декабря 2025 г.

Методами акустической и электромагнитной эмиссии (АЭ и ЭМЭ соответственно) оценивался выход энергии образования микротрещин и локальных искажений структуры цементного камня ЦК М400 при точечном ударе. Эксперименты проведены на образцах с сухой и увлажненной поверхностью. Индуцированные ударом развертки АЭ и ЭМЭ были сопоставлены с процессами вынужденной трансформации материала, а именно: микропластическая деформация; пьезоэффект; смещение двойных электрических слоев на границах зерен и наполнителя; то же на внутренних поверхностях естественных (технологических) микрополостей в ЦК; стекание и аннигиляция зарядов, возникших на стенках наведенных ударом трещин, после прохождения ударной волны.

Ключевые слова: строительный материал, ударное повреждение, пьезоэффект, акустическая эмиссия, электромагнитная эмиссия.

DOI: 10.61011/FTT.2026.02.62717.345-25

1. Введение

Поверхность строительного цементного камня (ЦК) в естественных условиях находится под влиянием изменчивых сезонных значений влажности и температур [1], неизбежно влияющих на его механические свойства. Эти параметры непосредственно связаны между собой, поскольку содержание жидкой воды в поверхностном слое ЦК напрямую зависит от температурно-гигроскопических параметров воздуха. В представляемом исследовании условия экспериментов были актуальны для случая применения бетонных конструкций в умеренно-континентальном, с чертами морского, климате, в летних условиях [2].

При изучении характера механически стимулированной деградации структуры ЦК на микроскопическом уровне широко распространены эмиссионные методы: акустики [3–6] и электромагнитного излучения [7–11]. Акустическая эмиссия (АЭ) используется как для мониторинга накопления трещин с целью оценки структурной стабильности строительных объектов, так и для определения ударной прочности образцов ЦК путем сравнительного анализа состава и свойств изделий [3]

Электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) применяется преимущественно при исследованиях механизма разрушения как индикатор различных процессов трансформации структуры материала под динамичной нагрузкой. Известно [8–15], что при ударной нагрузке ЦК могут иметь место несколько механизмов генерации ЭМЭ, в том числе:

(A) электрический отклик на ударное воздействие ЦК, связанное с пьезоэлектрическим эффектом во включениях кварца [8,10];

(B) появление ЭМЭ при смещении ударной волной двойных электрических слоев, расположенных на границах зерен и наполнителя [9,11,12];

(C) движение зарядов в порах ЦК под действием ударной волны [13];

(D) после прохождения ударной волны ЭМЭ возникает при аннигиляции индуцированных противоположных зарядов на схлопывающихся стенках микротрещин [14,15].

В настоящей работе одновременная регистрация АЭ и ЭМЭ использована для наблюдения генерации и накопления микротрещин при локализованном ударе по сухой либо влажной поверхности образцов ЦК.

2. Образцы и оборудование

Использованы образцы ЦК М400 в составе двух групп, приготовленных в различных гигрометрических состояниях и температурах воздуха, влияющих на характер повреждения поверхности при ударном воздействии. Одна из групп, поверхность образцов которой назовем условно влажной, была предварительно выдержана в течение 12 h при температуре 20 °C в боксе с влажностью воздуха 70 %, тогда как другая (условно сухая) группа прогревалась такое же время на открытом воздухе при температуре 80 °C.

Образцы размером $10 \times 10 \times 20$ mm помещались на металлическую плиту со слоем консистентной смазки. На образец устанавливался заостренный боек из закаленной стали, на который с высоты 70 cm падал груз весом 100 g. При ударе на поверхности образца возникало

повреждение материала в пятне диаметром $1-2\,\mathrm{mm}^2$ с хорошо воспроизводимой морфологией.

Система регистрации сигнала АЭ запускалась в момент касания грузом бойка. Пьезоэлемент из высокочувствительной керамики PZT регистрировал в диапазоне $80-600\,\mathrm{kHz}$ временные развертки АЭ, вызванные образованием микротрещин в материале ЦК. Максимальный сигнал ЭМЭ возникал в диапазоне $1-20\,\mathrm{kHz}$ и принимался диполем Герца.

Эмиссионная активность обоих типов записывалась в течение 4 ms с временным разрешением 40 ns. Сигналы АЭ и ЭМЭ поступали на вход аналого-цифрового преобразователя АСК-3106 и в цифровой форме сохранялись в компьютере.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Сухой образец

На рис. 1 показаны развертки сигналов АЭ и ЭМЭ, записанные при ударном повреждении поверхности образца, подвергнутого термической обработке (сушке).

Развертка АЭ (рис. 1, *a*) включает два периода активности: излучение звука длительностью $\sim 2\,\mathrm{ms}$ и последующий выброс более мощного сигнала в течение $\sim 1\,\mathrm{ms}$. Начальный период — всплеск выхода АЭ объясняется разрушением перегородок между порами из-за отсутствия пластической деформации в сухом материале. Исчерпание „слабых мест“ отчетливо проявляется в уменьшении интенсивности АЭ по истечении $\sim 2\,\mathrm{ms}$, после чего деградация материала переходит на другой уровень — достигается критическая деформация, ведущая к возникновению более крупных трещин с массовым смещением зерен заполнителя и, соответственно, второго периода генерации звука длительностью $\sim 1\,\mathrm{ms}$, после которой некоторое время продолжаются спорадические импульсы АЭ.

Развертка ЭМЭ (рис. 1, *b*) имеет более сложную структуру, включающую 4 независимых компонента, представляющих названные выше (A–D) механизмы возникновения электромагнитных сигналов. Наиболее интенсивную эмиссию следует отнести пьезоэлектрическому эффекту (кривая B на рисунке), который незначителен на стадии разрушения стенок пор (до примерно 1 ms), но при достижении критической деформации растет до пикового значения и быстро снижается.

Параллельно с электрическим сигналом, вызванном пьезоэффектом, под действием ударной волны сжатия возникают две развертки ЭМЭ (R, Y) с различной частотой генерации (Фрагмент 1). Мы относим более низкочастотную развертку (R) к появлению ЭМЭ при смещении ударной волной двойных электрических слоев, расположенных на границах зерен и наполнителя, а высокочастотную (Y) — движению зарядов в мелких порах.

Наконец, уход ударной волны вызывает „схлопывание“ трещин со стеканием релаксирующих пар зарядов (кривая G, Фрагмент 2).

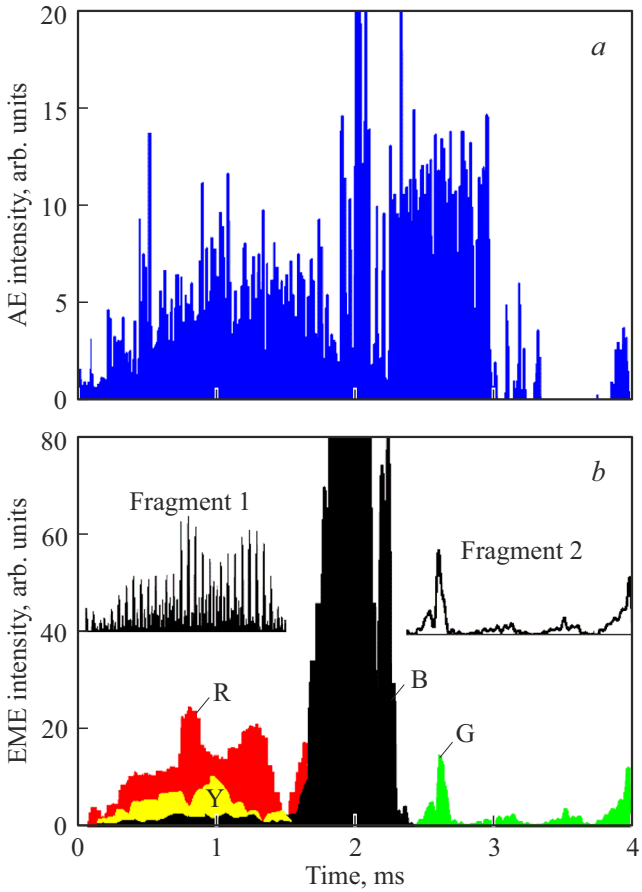

Рис. 1. *a* — развертки АЭ, возбужденные образованием трещин, и *b* — заштрихованные развертки ЭМЭ, генерированные пьезоэффектом (черный цвет), смешением двойных слоев зарядов (красный цвет), блужданием зарядов в порах (желтый цвет) и аннигиляцией зарядов при релаксации трещин (зеленый цвет) — для сухого образца. Вынесенные оригинальные фрагменты разверток поясняют идентификацию источников ЭМЭ.

3.2. Влажный образец

На рис. 2 показаны развертки сигналов АЭ и ЭМЭ, возбужденные прохождением ударной волны в образце, поверхность которого была насыщена влагой выдержкой в боксе, наполненном влажным воздухом. Генерация АЭ (рис. 2, *a*) не проявляется примерно до 1.5 ms. Причиной отсутствия акустического сигнала является высокая микропластичность влажной поверхности, препятствующая возникновению трещин. По приближении предельной деформации структуры появляется сигнал АЭ, который быстро достигает приблизительно такой же интенсивности, как при ударе по „сухому“ образцу, и конечный этап развертки идентичен таковому, показанному на рис. 1, *a*.

Активность ЭМЭ во влажном образце качественно подобна таковой для сухого ЦК (рис. 2, *b*). Однако в отличие от повреждения сухого образца, во влажном отмечено взаимодействие двойных электрических слоев между зернами и наполнителем (кривая R на рисунке) не только на стадии микропластического течения, но и

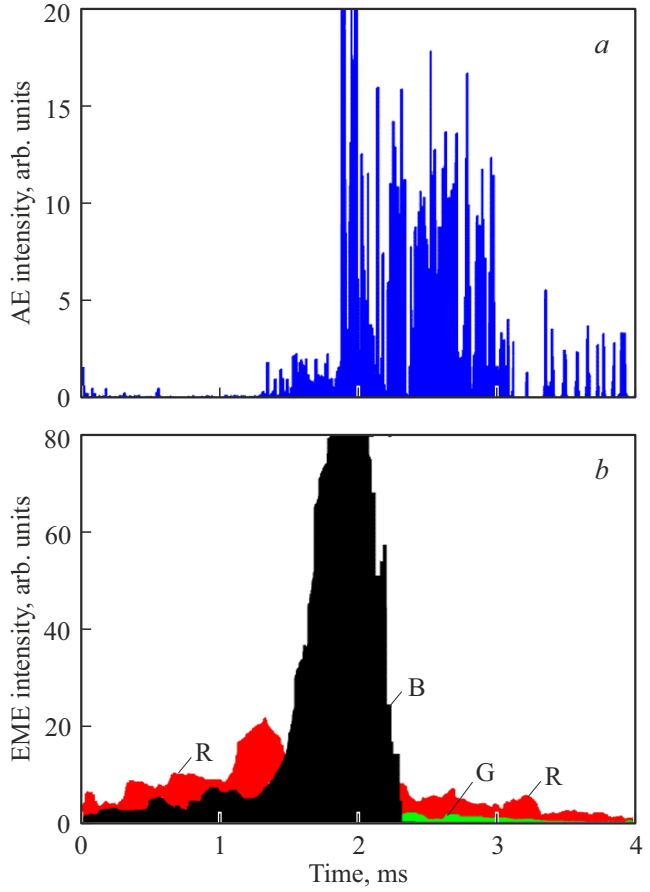

Рис. 2. То же, для влажного образца. Обозначения контуров разверток см. на рис. 1.

на конечной стадии релаксации индуцированных ударом трещин. Этот результат можно объяснить большей подвижностью компонентов ЦК во влажном материале.

4. Заключение

В проведенном исследовании комплексным применением акустической эмиссии и электромагнитной эмиссии наблюдались основные процессы эволюции структуры сухого либо увлажненного поверхностного слоя ЦК при локализованном ударе образцов. Методом АЭ показана роль внесенной влагой микропластичности при начальном воздействии копра, которая препятствует разрушению структурных связей материала. Однако массовое накопление трещин после исчерпания пластического течения было, фактически, идентичным по времени и интенсивности в сухих и влажных образцах.

Методом ЭМЭ наблюдалось проявление либо одновременной, либо последовательной активности всех основных процессов, вызывающих электрический отклик при механическом воздействии на ЦК:
(a) пьезоэлектрический эффект во включениях кварца; (b) смещение упругой волной двойных электрических слоев на границах зерен и наполнителя; (c) движение зарядов в порах ЦК под действием ударной волны; (d) аннигиляция индуцированных противоположных зарядов на схлопывающихся стенках микротрещин после прохождения ударной волны.

Повторный цикл сушки и увлажнения образцов показал воспроизводимость процессов механического отклика, характерных для, соответственно, хрупкой или пластичной структуры поверхности ЦК.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн. Вестник науки Сибири **4**, *5*, 89 (2012).
[2] V.I. Andreev, L.S. Polyakova. IJCCSE **14**, *1*, 178 (2018). https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-178-184
[3] J.-W. Lee, H. Kim, T.-M. Oh. KSCE J. Civil Eng. **24**, *9*, 2808 (2020). https://doi.org/10.1007/s12205-020-5697-0
[4] X. Li, T. Miao, T. Liu, R. Chen, A. Yu. Case Studies Constr. Mater. **22**, e04281 (2025).
[5] Q. Li, S. Zhang, S. Gu, H. Li, Z. Tan, S. Cai, W. Li, L. Zhang, C. Pan. Phys. Fluids **37**, *8*, 083337 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0275024
[6] A. Yu, X. Li, Z. Cheng, L. Liu, J. Shi, F. Fu. J. Perform. Constr. Facil. **39**, *4*, 04025028 (2025). https://doi:10.1061/jpcfev.cfeng-4981
[7] Т.В. Фурса, Н.Н. Хорсов, Е.А. Батурин. ЖТФ **69**, *10*, 51 (1999). [T.V. Fursa, N.N. Khorsov, E.A. Baturin. Tech. Phys. **44**, *10*, 1175 (1999).]
[8] Т.В. Фурса. ЖТФ **71**, *7*, 53 (2001). [T.V. Fursa. Tech. Phys. **46**, *7*, 840 (2001).]
[9] А.П. Суржиков, Т.В. Фурса, Н.Н. Хорсов. ЖТФ **71**, *1*, 57 (2001). [A.P. Surzhikov, T.V. Fursa, N.N. Horsov. Tech. Phys. **46**, *1*, 55 (2001).]
[10] T.V. Fursa, D.D. Dann, M.V. Petrov. CBM **155**, *11*, 451 (2017).
[11] Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, М.В. Петров, А.Н. Соколовский. ЖТФ **89**, *1*, 99 (2019). [T.V. Fursa, D.D. Dann, M.V. Petrov, A.N. Sokolovskii. Tech. Phys. **64**, *1*, 78 (2019).]
[12] A. Kumar, V.S. Chauhan, R. Kumar, K. Prasad. J. Nondestruct. Eval. **44**, *1*, 2 (2025). https://doi.org/10.1007/s10921-024-01140-2
[13] Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К.Ю. Осипов. Дефектоскопия *2*, 27–34 (2007).
[14] М.И. Мирошниченко, В.С. Куксенко. ФТТ **22**, *5*, 1531 (1980).
[15] D. Song, Q. You, E. Wang, X. Song, Z. Li, L. Qiu, S. Wang. Geomech. Engin. **19**, *1*, 49 (2019). https://doi.org/10.12989/gae.2019.19.1.049

Редактор Е.В. Толстякова