

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 550.3:535.378

РАЗМЕР, ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УДАРНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

И. П. Щербаков, В. С. Куксенко, А. Е. Чмель

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Email: chmel@mail.ioffe.ru,
ул. Политехническая, 26, 194021, г. Санкт-Петербург, Россия*

Образцы горных пород, значительно различающиеся по своим физико-механическим свойствам (граниты трех сортов, мрамор, кварцит), подвергались ударному разрушению. Регистрировалась фрактололюминесценция с повреждаемой поверхности и определялись амплитудно-частотные характеристики серий световых импульсов. Во всех изученных материалах наблюдалось появление межзеренных микротрещин. Повреждения на поверхности зерен в гранитах имели два характерных размера, отвечающих разрушению кварца и шпата, тогда как в минералах с однородным составом (мрамор и кварцит) отмечалось одномодальное распределение размеров повреждений на поверхности зерен.

Ударное разрушение, горные породы, фрактололюминесценция, микротрещины

Упругие волны из очага разрушения, возникшего под действием статической нагрузки или ударного воздействия, распространяются в горной породе на значительное расстояние, стимулируя зарождение и/или развитие микроскопических трещин в объеме материала. Процесс накопления повреждений регистрируется методами акустической и электромагнитной эмиссии [1, 2] благодаря генерации звука и релаксации возникших электрических диполей при формировании микротрещин в первом и втором случаях. В последнее десятилетие в исследованиях процесса разрушения все шире применяется еще один эмиссионный метод — фрактололюминесценция (ФЛ) [3–6], т. е. регистрация излучения света при деструкции материалов. Эмиссия фотонов происходит при разрыве химических связей в результате изменения локальной конфигурации электронной системы твердого тела, в частности при образовании первичных дефектов сплошности. В непрозрачных материалах методом ФЛ возможно исследование только поверхностного (например, ударного) разрушения.

Поскольку формирование первичного дефекта структуры происходит путем множественного разрыва межатомных связей, амплитудно-частотная характеристика временного ряда импульсов света позволяет определить характерное время роста отдельного дефекта до достижения стабильного состояния (как обратную частоту сигнала с наибольшей амплитудой) и оценить размер первичных дефектов исходя из полученного времени и известной скорости роста трещины в материале. Такие данные для гетерогенных материалов представляют интерес, поскольку они непосредственно связаны с проблемой локализации трещин, предшествующих или сопровождающих макроскопическое разрушение материала под механическим воздействием или/и при нагревании. Обычно решение этой задачи находится с помощью оптической [7] либо

электронной [8 – 10] микроскопии в условиях измерений *a posteriori*. Метод ФЛ позволяет получать сведения о размере первичных дефектов непосредственно в ходе их формирования, т. е. в динамике процесса.

В настоящей статье приведены результаты использования ФЛ для определения параметров трещин в ряде горных пород, подвергнутых ударному разрушению падающим грузом. Генерация света наблюдалась при повреждении поверхностей образцов трех различных гранитов, а также кварцита и мрамора.

Образцы и оборудование. Объектами исследования служили образцы кварцита, мрамора и гранитов трех видов: крупнозернистый гранит Рапакиви (размер зерна 3 – 5 мм), гранит Куру Грей со средним зерном (2 – 3 мм) и мелкозернистый гранит Сезам Блэк (~ 1 мм). Образцы вырезались в форме блоков размером примерно 15×20×20 мм.

Средний размер зерен испытанных образцов различался на два порядка (таблица). Наглядное представление о степени неоднородности/однородности материалов дают гистограммы коэффициента отражения света от поверхностей образцов (рис. 1). Поскольку каждый минерал имеет свой характерный коэффициент отражения R , цифровая фотография, сделанная в отраженном свете, позволяет отличить компоненты с различными величинами R и выделить границы между зернами.

Параметры первичных микроповреждений при ударном повреждении некоторых геоматериалов

Материал	Происхождение	Средний размер зерен, мм	Частота максимума АЧХ, МГц		Размер повреждения, мм		Время формирования повреждений, мкс	
			между зерен	на зернах*	между зерен	на зернах*	между зерен	на зернах*
Гранит Рапакиви	Южная Финляндия	3 – 5	0.2	1.6/13	3	0.4/0.05	0.8	0.1/0.012
Гранит Куру Грей	Южная Финляндия	2 – 3	0.2	1.8/12	3	0.35/0.05	0.8	0.08/0.015
Гранит Сезам Блэк	Китай, провинция Фудзянь	~ 1	0.25	2/10	2.5	0.3/0.06	0.6	0.08/0.015
Кварцит	Россия, Карелия	0.1 – 0.2	0.25	6	2.5	0.1	0.6	0.025
Мрамор	Нет данных	0.05 – 0.1	0.3	6	1	0.05	0.5	0.025

*Для гранитов приведены пары значений, отвечающих разрушению на зернах двух основных компонентов этих материалов.

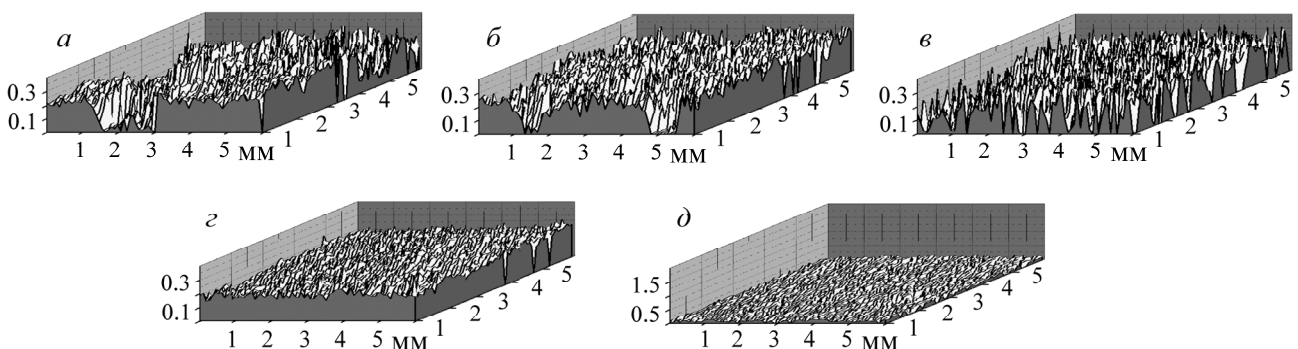


Рис. 1. Распределение коэффициента отражения света от поверхности образцов, полученное с цифровых фотографий, сделанных в отраженном свете. Здесь и на рис. 3 и 4: *a* — гранит Рапакиви; *б* — гранит Куру Грей; *в* — гранит Сезам Блэк; *г* — мрамор; *д* — кварцит

Схематическое изображение установки приведено на рис. 2. Образцы помещались на массивную металлическую подставку. Повреждение поверхности проводилось падающим грузом массой 100 г со скоростью удара 1 м/с на стальной боек, поставленный на образец.

Люминесценция с поверхности образца собиралась кварцевой линзой и направлялась на фотоумножитель ФЭУ-136, с которого сигналы ФЛ поступали на вход аналогово-цифрового преобразователя АСК-3106. Система регистрации запускалась в момент касания грузом бойка. Напряжение на выходе преобразователя записывалось в память компьютера (ПК) с шагом 10 нс при максимальной продолжительности сбора сигналов 0.8 мс. Предельная частота регистрируемых сигналов составляла 100 МГц.

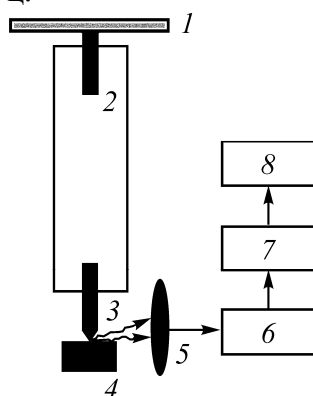


Рис. 2. Схема установки для регистрации ФЛ при ударном разрушении: 1 — электромагнит; 2 — груз; 3 — боек; 4 — образец; 5 — кварцевая линза; 6 — ФЭУ-136; 7 — АЦП АСК-3106; 8 — ПК

Экспериментальные результаты и обсуждение. Временные развертки амплитуд сигналов ФЛ из разрушаемых образцов показаны на рис. 3. Серии расположены в последовательности от более крупнозернистых материалов к более мелкозернистым. Запаздывание сигнала примерно на 40–50 мкс от момента касания грузом бойка связано с прохождением упругих волн от груза до образца.

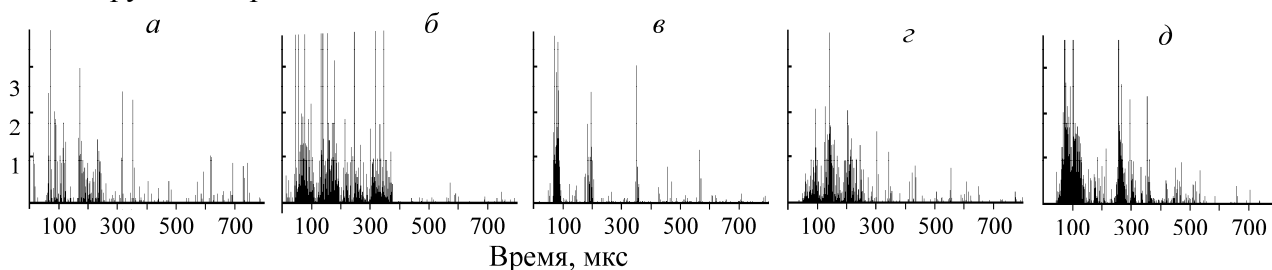


Рис. 3. Временные развертки интенсивности сигналов ФЛ, генерированные при ударном разрушении геоматериалов

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) полученных серий приведены на рис. 4. Можно видеть, что в АЧХ гранитов проявляются три пика, расположенных на частотах 0.2, 1.8 и 10–13 МГц. АЧХ серии ФЛ из мрамора кварцита имеют по паре широких пиков в области примерно 0.3 и 6 МГц.

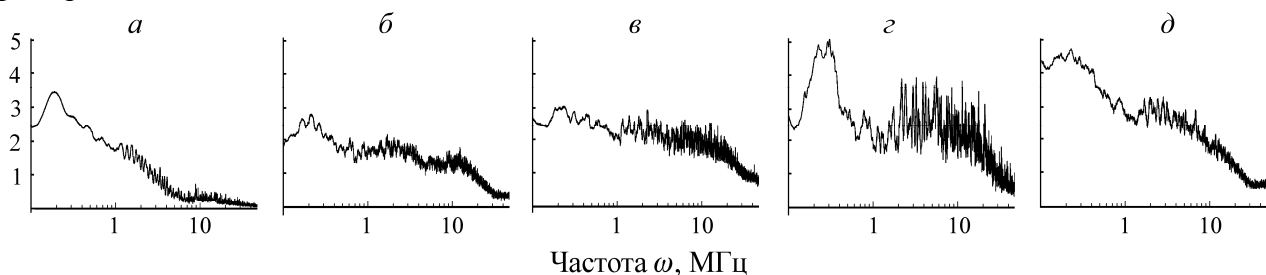


Рис. 4. АЧХ временных серий ФЛ, показанных на рис. 3

Частота каждого пика ω пропорциональна скорости формирования дефекта, непрерывно излучающего свет V , и обратно пропорциональна времени формирования $\omega = 1/2\pi\tau$. Поэтому размер дефекта L можно определить из соотношения $L = 2\pi\tau V$.

Скорость роста трещин V в геоматериалах при разрушении со скоростью удара 1 м/с составляет в гранитах и кварците приблизительно 10^2 м/с, а в мраморе в 2 раза меньше [11]. В таблице приведены размеры дефектов, излучающих свет, и времена их формирования. Поскольку в АЧХ всех материалов наблюдались пики, частоты которых различались на порядок, то при их отнесении мы исходили из того, что низкочастотные максимумы отвечают крупным (межзеренным) трещинам, а высокочастотные — микротрещинам, локализованным на поверхности зерен. Так как прочность полевого шпата существенно ниже, чем кварца (~ 150 МПа против ~ 500), можно полагать, что более мелкие трещины принадлежат микротрещинам на зернах кварца. В однокомпонентных материалах — мраморе и кварците — трещины на зернах сравнимы с размерами зерен соответственно кальцита и кварца.

ВЫВОДЫ

Метод фрактолюминесценции позволяет наблюдать зарождение и формирование трещин в горных породах при ударном разрушении. В отличие от широко распространенных методов акустической и электромагнитной эмиссий, чувствительных к появлению микротрещин во всем объеме образцов, метод ФЛ в непрозрачном материале регистрирует только сигналы, исходящие из поверхностного очага разрушения.

В амплитудно-частотных характеристиках ФЛ из горных пород наблюдались пики, принадлежащие как крупным (1–3 мм) трещинам, так и микротрещинам на поверхности зерен минералов. В мелкозернистых материалах (мрамор и кварцит) размер последних сравним с размером зерен. В гранитах размеры трещин на кварце и полевоом шпате различались на порядок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кадомцев А. Г., Дамаскинская Е. Е., Куксенко В. С.** Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // ФТТ. — 2011. — Т. 53. — № 9. — С. 1777–1782.
2. **Яковицкая Г. Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — Новосибирск: Параллель, 2008. — 315 с.
3. **Kawaguchi Y.** Luminescence spectra at bending fracture of single crystal MgO, *Solid State Commun.*, 2001, Vol. 117, No. 1. — P. 17–20.
4. **Pallares G., Rountree C. L., Douillard L., Charra F., Bouchaud E.** Fractoluminescence characterization of the energy dissipated during fast fracture of glass, *Europhys. Lett.*, 2012, Vol. 99, No. 2. — P. 28003, 5 pages.
5. **Hollerman W. A., Fontenot R. S., Bhat K. N., Aggarwal M. D., Guidry C. J., Nguyen K. M.** Comparison of triboluminescent emission yields for 27 luminescent materials, *Optical Mater.*, 2012, Vol. 34, No. 9. — P. 1517–1521.
6. **Kawaguchi Y.** Time-resolved fractoluminescence spectra of silica glass in a vacuum and nitrogen atmosphere, *Phys. Rev. B*, 1995, Vol. 52, No. 13. — P. 9224–9230.
7. **Menéndez B., David C., Daroy M.** A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using confocal scanning laser microscopy, *Phys. Chem. Earth, Part A: Solid Earth Geodesy*, 1999, Vol. 24, No. 7. — P. 627–632.
8. **Fredrich J. T., Wong T. F.** Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks, *J. Geophys. Res.*, 1986, Vol. 91, No. B12. — P. 12743–12764.
9. **Wang H. F., Bonner B. P., Carlson S. R., Kowallis B. J., and Heard H. C.** Thermal stress cracking in granite, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1989, Vol. 94, No. B2. — P. 1745–1768.
10. **Homand-Etienne F., Houpert R.** Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis, *Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech.*, 1989, Vol. 26, No. 2. — P. 125–134.
11. **Мавлютов М. Р.** Разрушение горных пород при бурении скважин. — М.: Недра, 2008. — 216 с.

Поступила в редакцию 11/1 2016