

УДК 550.348; 550.37 (575.2) (04)

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВОЗДЕЙСТВИЙ
ДЛЯ РАЗРЯДКИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
(НА ОБРАЗЦАХ КЕРАМИКИ)**

А.С. Закупин – мл. научн. сотр.

The results of laboratory modeling of process of elastic energy release during geomaterials fracture have been represented. The effect of weak physical fields on rock specimens straining is studied; the change in acoustic emission of manifestation of straining rate was taken into account.

Нами исследованы деформационные процессы на материалах другого класса – образцах технической циркониевой керамики. Известно, что циркониевая керамика занимает ведущее место среди огнеупорных конструкционных материалов и широко используется в промышленности, поскольку сохраняет высокие механические свойства до температур порядка 3000 К. По своим электрическим свойствам ее относят к диэлектрикам, однако в результате пористой структуры диэлектрические свойства чувствительны к водонасыщению материала. Как модельный геоматериал такая керамика представляет интерес ввиду простоты изменения водонасыщенности и подбора образцов нужной пористости для проведения физического моделирования деформационных процессов в геосреде. Известно, что водные растворы, частично заполняющие поровое пространство породных массивов (природные электролиты), играют немаловажную роль в деформационных процессах и определяют геоэлектрические свойства среды.

С учетом недавно обнаруженного эффекта электрочувствительности акустоэмиссионной активности нагруженных геоматериалов [6–8] очевидна значимость выявления подобных эффектов для частично водонасыщенных образцов циркониевой керамики, испытываемых в присутствии электромагнитных импульсов.

Нелинейные структурные свойства нагруженных образцов горных пород (накопление дефектов, проскальзывания на границах зерен и прочие изменения на мезоструктурных масштабах), несмотря на незначительную деформацию (несколько десятых процента) проявляются в режиме акустической эмиссии (АЭ). В зависимости от пространственно-временных масштабов образование и рост микротрещин, являющихся источниками сигналов АЭ, могут рассматриваться как случайный или закономерный процесс. Так, двухстадийная модель разрушения [1, 2] описывает распределение микротрещин на первой, диффузной стадии разрушения как Пуассоновский процесс. Примером неслучайного процесса генерации сигналов АЭ из относительно небольшой подобласти образца может быть случай, когда имеется концентратор напряжения. При переходе от первой ко второй стадии нагруженная среда описывается как система с самоорганизованной критичностью (СОК) [3, 4].

Общим свойством всех систем с самоорганизованной критичностью является наличие флуктуаций, которые становятся все более интенсивными по мере приближения к критической точке. Неудивительно, что в лабораторных экспериментах по моделированию энерговооздействий наблюдались флуктуации активности АЭ, затрудняющие исследование

откликов АЭ активности на внешние энерговоздействия. Однако в ряде случаев [2] удается различить среди этих флуктуаций отклики на энерговоздействия, что позволяет изучать закономерности их влияния на релаксацию избыточных напряжений.

В [5, 6] рассмотрены деформационные процессы на образцах различных горных пород, таких как каменная соль, гранит, гранодиорит и др. Кроме естественных породных материалов, испытывались также и искусственные композитные материалы – бетонные образцы с различными неоднородными включениями.

Методика экспериментов. Эксперименты на одноосное сжатие ($\sigma_1 = P$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) проводили на пружинной реологической установке УДИ с максимальным усилием сжатия 100 т (разработана А.Н. Ставрогиным, ВНИМИ, С.-Петербург). Датчики АЭ и электродные щетки крепились к боковой поверхности образца.

В качестве изолятора в каналах МГД-генератора использовалась циркониевая керамика. Были изготовлены образцы правильной формы (параллелепипеды размерами 35x115x175). Изучение неупругих деформационных процессов в среде перегруженной воздействием электромагнитного поля, как и в предыдущих работах, проводилось на основе анализа режима акустической эмиссии. Энерговоздействие осуществлялось с помощью трёх типов модельных источников: генератора прямоугольных импульсов Г5-54, 10 кВ индукционного искрового генератора, генератора прямоугольных импульсов ГИ-1 (напряжение порядка 350 В) и генератора синусоидальных импульсов ГЗ-112. В случае экспериментов на УДИ для моделирования вибровоздействий применялся точечный источник (буззер), плотно закрепляемый на образце. Для организации вибросеансов на буззер подавался синусоидальный сигнал генератора ГЗ-112. В течение вибросеанса контролировалось постоянство амплитуды и частоты сигналов на входе вибропреобразователя (источника).

Отметим, что высокая чувствительность АЭ к неупругим деформационным процессам позволила в экспериментах исследовать реакцию геоматериалов на весьма слабые воздей-

ствия, соответствующие сравнительно скромной энергетике техногенных воздействий на геологическую среду по сравнению с тектоническими процессами. Более подробно методика экспериментов изложена в [6, 7].

Результаты. Полученные результаты интерпретировались на основе графиков временной зависимости активности АЭ. С учетом того, что акустическая эмиссия непосредственно связана с деформационными процессами в нагруженной среде на микро- и мезоструктурных уровнях, активность АЭ является информативным параметром, отражающим ход деформационного процесса с высоким временным разрешением. На рис. 1 представлены результаты, полученные в ходе экспериментальной сессии при значении главной сжимающей нагрузки 1 т (12,5% от разрушающей) и наличии внешнего источника ЭВ – генератора прямоугольных импульсов Г5-54 – без дополнительного воздействия (нагрузка 3 т). Как видно из рис. 2, активность АЭ в условиях деформирования образца без внешнего ЭВ постепенно падает и через определенный промежуток времени (2000–3000 с) выходит на квазистационарный уровень (фон). Для значений нагрузок (рис. 1, 2), средний уровень активности АЭ в стационарном режиме низкий (близкий к нулю), как и характерная амплитуда спонтанных флуктуаций (рис. 2). Как видно из рис. 1, отклик на внешнее воздействие, начало которого соответствует уже установившемуся режиму АЭ, зафиксирован с небольшой задержкой после воздействия (около 100 с) и выражен в заметном увеличении активности АЭ. В данном примере отклик можно представить состоящим из двух частей: первая относится к резкому росту активности и затем её снижению (длительность около 1000 с), а вторая – к некоторой стабилизации на уровне, заметно превышающем фоновый (длительность около 2000 с момента прекращения внешнего воздействия). После выключения источника ЭВ заканчивается вторая фаза отклика и происходит быстрый спад активности АЭ. Следует отметить, что чем ниже нагрузка, тем меньше количество образующихся дефектов и больше времени затрачивается на рост уже существующих (при сравнении рис. 1 и 2 необходимо различать термин “фоновый” уровень АЭ).

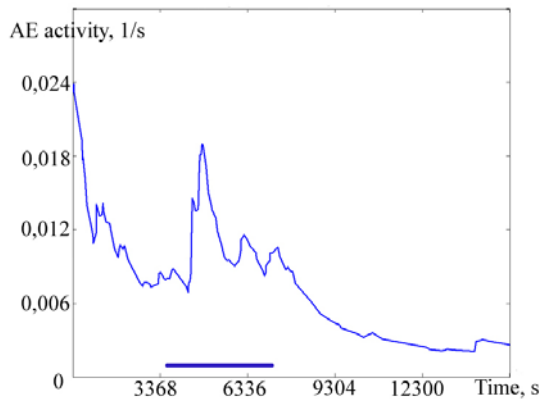


Рис. 1. Активность АЭ при воздействии импульсами Г5-54 ($f = 20$ кГц, $\tau = 5$ мкс, $u = 60$ В). Величина нагрузки 12,5% от разрушающей.

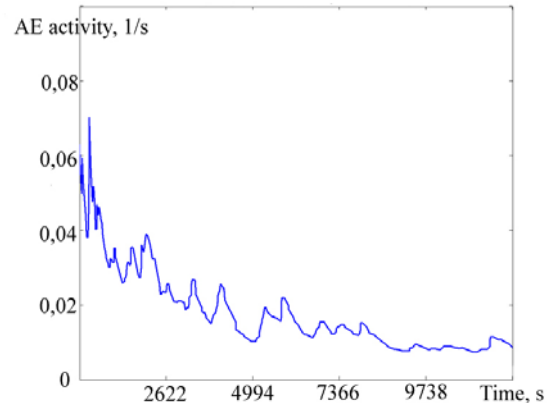


Рис. 2. Активность АЭ без внешнего воздействия. Величина нагрузки 37,5% от разрушающей.

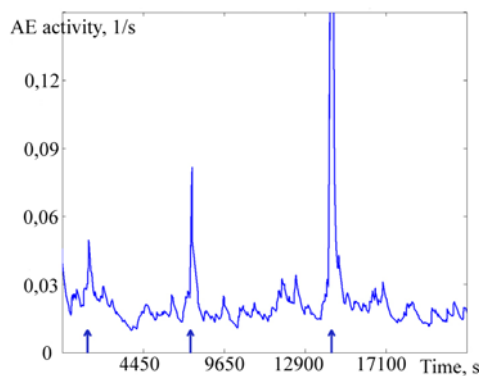


Рис. 3. Активность АЭ при воздействии искровым разрядником (напряжение до 10кВ). Проведено по 3, 13 и 20 разрядов соответственно. Величина нагрузки 68% от разрушающей.

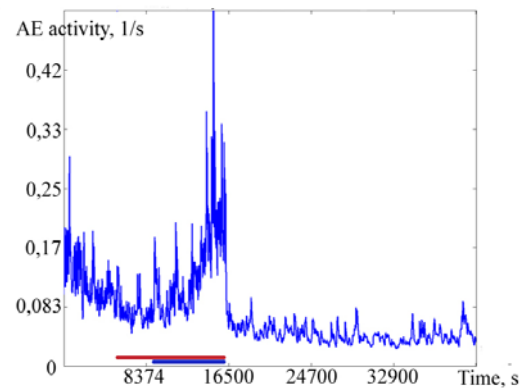


Рис. 4. Активность АЭ при воздействии импульсами генератора ГИ-1 ($f = 25$ кГц, $u = 350$ В) и ГЗ-112 ($f = 2,2$ кГц). Величина нагрузки 75% от разрушающей.

На рис. 3 в качестве модельного источника ЭВ применялся индукционный искровой генератор, позволяющий проводить воздействие кратковременными высоковольтными импульсами. В ходе сессии были проведены три серии импульсного воздействия: по 3, 13 и 20 разрядов с интервалом воздействия длительностью 10 с. Как видно из рис. 3, отклики на воздействие имеют схожие параметры, однако различаются по амплитуде. Все три отклика на ЭВ имеют резкий фронт нарастания и небольшую продолжительность. Различие в амплиту-

де может характеризовать как соотношение количества разрядов в сериях, так и кумулятивный эффект от предыдущих разрядов (к примеру основная часть событий АЭ в третьей серии ЭВ приходится на период времени после 10 разряда). Анализ событий АЭ показал, что соотношение разряд-событие в третьей серии ЭВ составляет 1:5. Это значит, что при среднем уровне активности (фоном) 0,02 (2 события в 100 с) увеличение активности на участке третьей серии ЭВ, где разряды следовали со скважностью 10 с, было не менее чем в 15

раз. На основе полученного результата можно сделать предположение, что в отмеченном эффекте немаловажную роль играет процесс накопления заряда, что и объясняет быстрый отклик на мощные импульсные воздействия и длительные задержки на квазистационарные воздействия слабыми импульсами.

Результаты предыдущих исследований показали, что эффекты электромагнитного воздействия на образцах различных горных пород проявляются более четко в области нагрузок 80–90% от разрушающих. Отмечено, что в этой области материал близок к состоянию потери устойчивости, и в нем развивается множество локальных очагов, количество которых сравнительно мало на меньших нагрузках. Понятно, что в таком состоянии материал обладает повышенной триггерной чувствительностью к внешним воздействиям и даже слабое внешнее возмущение способно привести к бифуркации материала в новое стабильное состояние с более высоким уровнем АЭ. Представляло интерес провести экспериментальную сессию на нагрузке близкой к этому диапазону (80–90%) для определения порога нагрузки, за которым материал попадает в неустойчивое состояние. Кроме этого, в [8] было отмечено, что именно в этом диапазоне нагрузок образцы горных пород чувствительны к комбинированному воздействию различных модельных источников. В соответствии с отмеченным выше была проведена экспериментальная сессия, в которой на образец воздействовало вибрационное поле с использованием ГЗ-112, а через некоторое время после включения источника вибраций дополнительно электроимпульсы генератора ГИ-1.

Измерения проводили при величине нагрузки 75% от разрушающей (рис. 4). В результате комбинированного воздействия было отмечено увеличение активности АЭ. На фоне значительных спонтанных флуктуаций, а при высоких напряжениях их больше как в количественном отношении, так и в отношении амплитуды выбросов, можно выделить медленное увеличение активности АЭ после включения источника электроимпульсов. Крутизна фронта нарастания активности значительно увеличилась через 3000 с после начала роста. В это время активность АЭ возросла по сравнению с фоном в 30 раз и наметилась ста-

билизация нового уровня (не уменьшение), были отключены оба источника. В момент отключения источников активность резко упала до уровня немного меньшего, чем фоновый после пригрузки. Результаты исследований комбинированного воздействия на образцы нагруженных геоматериалов, представленные в статье, подчеркивают еще более широкие возможности оптимизации источников внешних энергетических воздействий. Дальнейшие исследования по оптимизации могут способствовать разработке методики управления деформационными процессами в нагруженных средах на основе анализа откликов АЭ.

Заключение. Результаты лабораторных исследований доказывают существование связи между режимом АЭ образцов циркониевой керамики, подвергающихся деформированию в условиях одноосного сжатия, и воздействию внешних физических полей. Анализ экспериментальных данных позволил выделить следующие основные факторы, от которых зависит характер отклика среды на внешнее воздействие: главное сжимающее напряжение, время от последнего изменения нагрузки, а также параметры источника ЭВ. Результаты экспериментов по изучению влияния на образцы керамики вибрационного и электромагнитного полей одновременно подтвердили высокую чувствительность нагруженной среды к комбинированным воздействиям различных физических полей. Характерные признаки отклика на ЭВ позволяют выделять его на фоне спонтанных флуктуаций. Показано, что количество спонтанных всплесков растет по мере увеличения нагрузки. Вместе с тем, замечено, что кратковременная спонтанная активация является неотъемлемым свойством среды вблизи порога потери устойчивости. Именно в этих условиях, зачастую определяемых как “самоорганизованная критичность”, отчетливо проявляется повышенная “электрочувствительность” режима АЭ.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту № YG1-2316-BI-02 Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (АФГИР) и гранту №03-05-65077 Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Литература

1. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. – 1977. – №6. – С. 11–16.
2. Куксенко В.С. Модель перехода от микро-к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. – 1986. – С. 36–41.
3. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Phys.Rev. A. – 1988. – V. 38. – P. 364–374.
4. Bak P., Tang C. Earthquake as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys.Res. – 1989. – V. 94. – P. 15635–15637.
5. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Пономарев А.В., Соболев Г. Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора // Научн. тр. ИТЭС ОИВТ РАН / Под. ред. В.Е. Форгова и А.П. Лихачева. – Вып. 3. – 2000. – С. 217–224.
6. Закутин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Ред. С.В. Гольдин и Ю.Г. Леонов. – М., 2003. – С. 304–318.
7. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE Response of Rocks to Electric power Action as Seismic-Electric Effect Manifestation // Magnetic, Electric and Electromagnetic Methods in Seismology and Volcanology, Proc. III Int. Workshop (MEEMSV-2002). – Moscow, 2002. – P. 99–102.
8. Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закутин А.С., Ильичев П.В., Сычев В.Н. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энерговоздействиях физическими полями // Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия (Докл. Межд. геофизич. конф.). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 168–172.