

УДК 53.097, 539.3

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ АКУСТИЧЕСКИХ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

*В.А. Мубассарова*

Представлены результаты испытания образца мрамора в режиме квазистатического нагружения на рычажной установке для одноосного сжатия с регистрацией акустоэмиссионного излучения и деформации. Показано, что использование современного оборудования и аппаратурно-программного оснащения позволяет расширить рамки понимания процессов деформирования образцов горных пород под воздействием внешнего электромагнитного поля.

*Ключевые слова:* горные породы; разрушение; деформация; акустическая эмиссия; активность АЭ; электромагнитное воздействие; триггерное влияние.

---

## MODERN SOLUTIONS IN PROBLEM OF ACOUSTIC AND TENSOMETRIC MEASUREMENTS IN ROCKS TESTING

*V.A. Mubassarova*

This work presents the results of testing a marble specimen in the quasi-static loading with the lever construction for uniaxial compression with the registration of acoustic-emission and deformation. It is shown that using of modern equipment, hardware and software enables to understanding broaden of the rock samples deformation processes under the influence of an external electromagnetic field.

*Key words:* rocks; fracturing; deformation; acoustic emission; activity of AE; electromagnetic influence; trigger effect.

**Введение.** Исследование влияния внешних электромагнитных (ЭМ) полей и вибраций на нагруженные гетерогенные среды с целью разрядки избыточных напряжений в среде является актуальной задачей современной науки. Влияние электроимпульсов на акустическую эмиссию (АЭ) образцов горных пород, имитирующих геологическую среду, исследовалось в ряде работ [1–4]. В [5] выявлен эффект изменения активности АЭ под влиянием внешних электромагнитных полей и вибраций. Образцы горных пород и искусственных материалов лаборатории Научной станции РАН испытывали при постоянном сжатии при помощи пружинной реологической установки УДИ конструкции А.Н. Ставрогина, с максимальным усилием сжатия 100 тонн [6]. Однако данная установка имеет ряд недостатков, например, падение уровня нагружающего усилия при испытаниях геоматериалов, что происходит из-за частичной разгрузки пружины вследствие деформации образцов. Также одним из важнейших параметров при испытаниях горных пород является деформация образцов, регистрация которой ранее в экспериментах

не производилась. В данной работе представлены результаты испытаний на образце мрамора с использованием современных аппаратурных и программных комплексов, позволяющих регистрировать отклики на воздействие электромагнитного поля в акустической эмиссии и деформации с высокой точностью.

**Методика экспериментов.** Испытания горных пород в лаборатории МЭС проводили на рычажной установке (максимальное усилие сжатия 35 т), обеспечивающей бесшумные эксперименты на механическое одноосное сжатие с регистрацией акустического излучения в образце (рисунок 1). Данная установка позволяет проводить испытания геоматериалов в режиме увеличивающейся с постоянной заданной скоростью нагрузки, а также в квазистатическом режиме (при постоянном уровне нагрузки). Установка имеет систему трех рычагов, изменение усилия сжатия происходит за счет увеличения груза на крайнем рычаге (рисунок 1).

В качестве датчиков, регистрирующих деформацию (продольную и поперечную) и нагрузку, применяются линейные дифференциальные

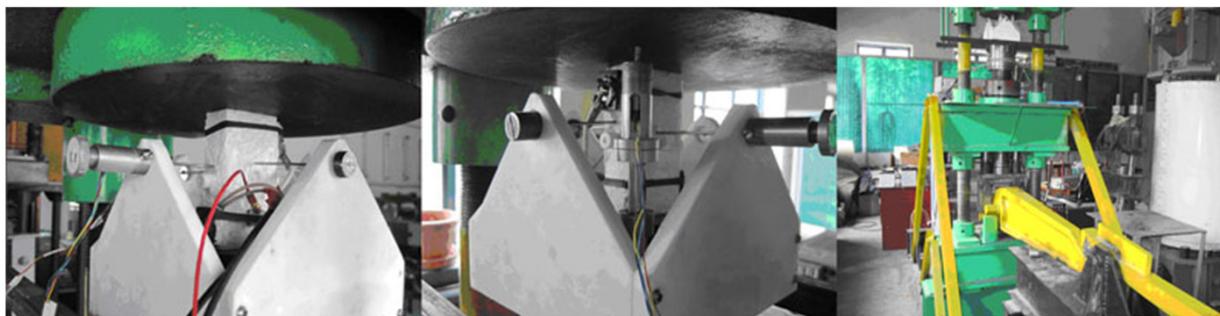


Рисунок 1 – Рычажная установка с установленными образцами для испытаний

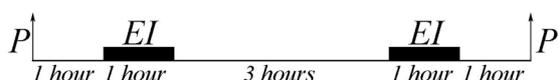


Рисунок 2 – Схема постановки эксперимента:  
P – пригрузка, басы EI – интервалы воздействия скрещенным ЭМ полем

трансформаторы LVDT фирмы Lucas Shaevitz, предназначенные для измерения линейных перемещений. Эти датчики обладают высокой точностью, линейностью, чувствительностью и разрешением, стабильностью к температурным изменениям, а также обеспечивают работу без трения с высокой жесткостью. В настоящее время в штатном режиме используются датчики трех типов: MHR 005, MHR 010 и MHR 050, обладающие следующими диапазонами регистрируемых линейных перемещений:  $\pm 0,005'' \approx \pm 0,127$  мм;  $\pm 0,01'' \approx \pm 0,254$  мм и  $\pm 0,05'' \approx \pm 1,27$  мм соответственно [7].

Разрешение тензометрической системы позволяет фиксировать изменение нагрузки на образце 14,8 кг/мВ, продольной компоненты деформации 2 мкм/мВ, поперечной компоненты деформации 1,25 мкм/мВ (в случае датчиков MHR 010) или 0,6 мкм/мВ (в случае датчиков MHR 005). Система регистрации деформации и нагрузки состоит из блока измерительных усилителей, сигнал с которых оцифровывается низкочастотным АЦП ЛА-И 24 USB и записывается на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме при помощи программного обеспечения, поставляемого в комплекте с блоком АЦП.

Сигналы акустической эмиссии (волновые формы) регистрировали пьезодатчиками фирмы DECI в широком и частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц, которые затем усиливались блоками предварительных и измерительных усилителей. Аппаратура работала в ждущем режиме, запуск осуществлялся по превышению сигнала на входе измерительного канала АЭ заданного

порогового значения. Сигналы оцифровывали быстродействующим 8-канальным блоком АЦП USB 3000 и записывали на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме. Обработка сигналов АЭ включала просмотр и отбраковку помех и потоковую обработку сигналов с построением временных зависимостей активности, длительности и энергии сигналов.

Дополнительные воздействия электромагнитных полей осуществляли во время измерительных сеансов при постоянном уровне нагрузки. Воздействие электрическими импульсами осуществляли при подаче на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, напряжения от генератора прямоугольных импульсов Г5-54 амплитудой до 50 В. Магнитное поле возбуждалось с помощью катушки, установленной у другой боковой поверхности, так, чтобы направление магнитного поля было перпендикулярно электрическому. Для питания катушки использовали генератор синусоидальных импульсов Г3-33. Синхронизацию фаз электрических импульсов генератора Г5-54, подаваемых на электроды, и генератора Г3-112, нагружающего магнитную катушку, обеспечивало специальное синхронизирующее устройство. Более подробно схема воздействия скрещенным электромагнитным полем описана в [8].

В качестве материала для испытания был выбран мрамор – осадочная порода, обладающая полухрупкими свойствами.

**Результаты экспериментов.** Рассмотрим результаты эксперимента со ступенчатым нагружением на образце мрамора с шагом изменения напряжения 20 МПа. В режиме постоянной нагрузки (CL) образец дважды подвергался действию скрещенного ЭМ поля. Схема постановки эксперимента представлена на рисунке 2. Всего было реализовано 5 квазистационарных уровней нагрузки и 10 сессий воздействия. Графики изменения напряжения и продольной деформации приведены на рисунке 3.

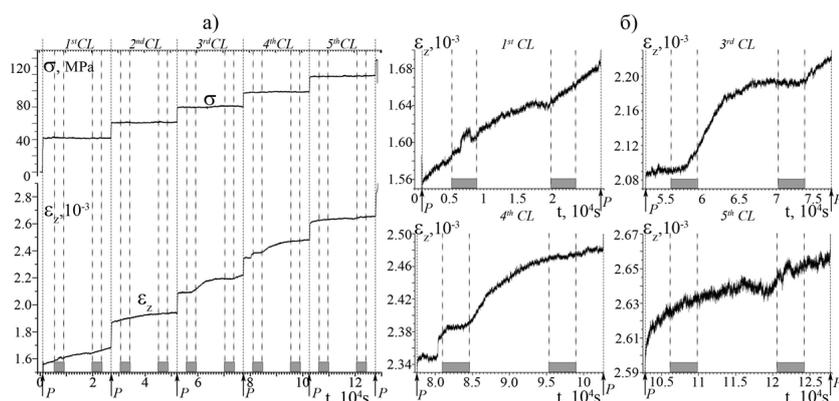


Рисунок 3 – а – изменения напряжения и продольной деформации за весь эксперимент; б – масштабированные графики продольной деформации в периоды квазистационарной нагрузки (CL) образца мрамора. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано серыми барами

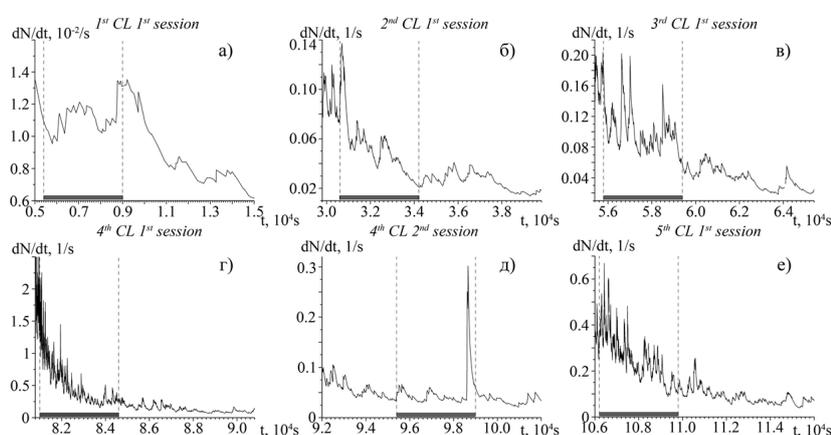


Рисунок 4 – Активность АЭ образца мрамора. Масштабированные примеры откликов на воздействие. Воздействие скрещенным ЭМ полем показано серыми барами

Отклики на воздействие в деформации были получены в 6 из 10 сессий воздействия. Как видно на рисунке 3, первый отклик в виде кратковременного прироста значения с последующим уменьшением произошел при напряжении 29 % от разрушения (1<sup>st</sup> CL) (см. рисунок 3, б). В дальнейшем при повторном воздействии на данной нагрузке после небольшого снижения скорости деформации наблюдали резкое ее увеличение сразу с момента включения источника воздействия. При этом характер изменения деформации сохранился и после выключения источника воздействия. Подобные кратковременные приросты значения деформации и изменения ее скорости вследствие воздействия скрещенным ЭМ полем были обнаружены и при более высоких значениях напряжения как с задержкой после включения источника ЭВ, так и без задержки.

В ходе анализа графика активности акустической эмиссии также были зарегистрированы отклики (рисунок 4) как на первые сессии воздействия после пригрузки, так и на повторные. Отметим, что отклик на повторное действие ЭМ поля был зафиксирован при напряжении 29 % от разрушения (рисунок 4, б). При напряжении 72 % от разрушения с задержкой 53 минуты от начала повторного ЭВ произошло кратковременное увеличение активности АЭ в 6 раз (рисунок 4, д).

**Закключение.** Ранее в экспериментах на пружинной прессе УДИ было показано, что отклики акустической эмиссии модельных образцов на внешние воздействия в 90 % случаев наблюдаются при нагрузках выше 70 % от разрушения, причем это справедливо для различных материалов и типов воздействия [2]. В данной работе эффект чувствительности мрамора и в акустоэмиссионном

и деформационном поле отмечен на нагрузке порядка 30 % от разрушения. Очевидно, что использование пружинного пресса ограничивало представление о поведении материала в присутствии внешних физических полей по причине несовершенства установки – падения уровня нагружающего усилия при деформировании образцов, вследствие чего происходила частичная разгрузка пружины. На данный момент комплекс, включающий тензометрическую систему и регистрацию сигналов акустической эмиссии, а также рычажную установку для одноосного сжатия образцов горных пород, обеспечивает все необходимые условия для исследования триггерных эффектов влияния электромагнитных полей на процессы деформирования и разрушения материалов в режиме одноосного сжатия.

#### Литература

1. Авагимов А.А. Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора / А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, А.В. Пономарев, Г.А. Соболев // Научные труды ИТЭС ОИВТ РАН; ред. В.Е. Фортов и А.П. Лихачев. М.: ОИВТ РАН. 2000. Вып. 3. С. 217–224.
2. Закупин А.С. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения / А.С. Закупин, А.А. Авагимов, Л.М. Богомолов // Физика Земли. 2006. №10. С. 43–50.
3. Куксенко В.С. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) / В.С. Куксенко, Б.Ц. Манжиков, К. Тилегенов и др. // ФТТ. 2003. Т. 45. № 12. С. 2182–2186.
4. Шпейзман В.В. Кинетика разрушения поликристаллической сегнетокерамики в механическом и электрическом полях / В.В. Шпейзман, Л.В. Жога // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 843–849.
5. Соболев Г.А. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. М.: Наука, 2003. 270 с.
6. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. М.: Недра, 1985. 271 с.
7. Ramon Pallas-Areny, John G. Webster. Sensors and Signal Conditioning / Ramon Pallas-Areny, John G. Webster // John Wiley. New-York, 1991.
8. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A. The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded rock specimens / A.S. Zakupin, L.M. Bogomolov, N.A. Sycheva // Materials Science and Engineering. A. 2009. V. 521–522. P. 401–404.