

УДК 550.348; 550.37(575.2)(04)

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА НАГРУЖЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ ГОРНЫХ ПОРОД ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ
И АКУСТОЭМИССИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

А.С. Закупин

Рассматривается лабораторное моделирование влияния электромагнитного поля на деформационные процессы в горных породах.

Ключевые слова: горная порода; микротрещинообразование; активность акустической эмиссии; электромагнитные импульсы; триггерный эффект.

Введение. Влияние электромагнитных полей на темп накопления дефектов в нагруженной геологической среде освещено во многих работах [1–3]. В зависимости от характерных масштабов это влияние проявляется в виде сейсмической, сейсмоакустической или акустоэмиссионной активности (АЭ). Следует отметить, что в этих работах рассматриваются результаты экспериментов, проводимых в условиях действия на образец квазистатической сжимающей нагрузки. Кроме того, в большинстве случаев тензоизмерений или не проводилось вовсе, или они были слишком грубыми, упор делался на АЭ. Измерение тензометрических параметров, таких как усилие сжатия, продольная и поперечная деформация, является неотъемлемой частью лабораторных экспериментов, поскольку они характеризуют напряженно-деформированное состояние испытываемого образца. Анализ деформирования и разрушения горных пород указывает на необходимость учета кооперативного взаимодействия различных процессов, реализуемых в диссипативной структуре. При этом могут быть учтены такие особенности процесса деформирования как чувствительность к скорости деформации, упрочнение, зависимость от истории нагружения, обратная ползучесть, разупрочнение и т.п. Нельзя обойти вниманием и характерный для горных пород эффект разрыхления (дилатансия), который характеризуется зависимостью относительного изменения объема θ от деформации сдвига Γ . Все эти процессы могут проявляться при наложении внешнего электромагнитного поля. Не исключено, что на каждой

стадии механизмы формирования упругого поля немеханической природы будут различны или существовать в комбинациях. Известно, что образование и рост микротрещин сопровождаются резкими изменениями механических напряжений в локальных областях деформируемого тела, что порождает упругое колебание, которое распространяется в объеме твердого тела в виде упругой волны. Таким образом, влияние нагрузки, вызывающей хрупкое разрушение, на постепенное снижение прочности неповрежденной горной породы – важная составляющая в оценке степени разрушения образцов горных пород. В данной работе приведены результаты исследования разрушения горных пород (мрамора) в условиях влияния электромагнитного поля на основе анализа данного процесса как акустоэмиссионным, так и тензометрическим методом.

Измерительная аппаратура и методика эксперимента. Испытания в ЛМЭС НС РАН проводились с помощью рычажного пресса, обеспечивающего нагрузку до 35 т и бесшумные условия проведения эксперимента, включая экспериментальные сессии с постоянной сжимающей нагрузкой, и с нагрузкой, увеличивающейся посредством добавления груза на длинном плече рычага. Сигналы АЭ регистрировались пьезодатчиками в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц. Аппаратура работала в ждущем режиме, запуск осуществлялся по превышению сигнала на выходе измерительного канала АЭ заданного порогового значения. Сигналы оцифровывались быстродействующим 8-канальным блоком АЦП USB 3000 и записывались на жесткий диск

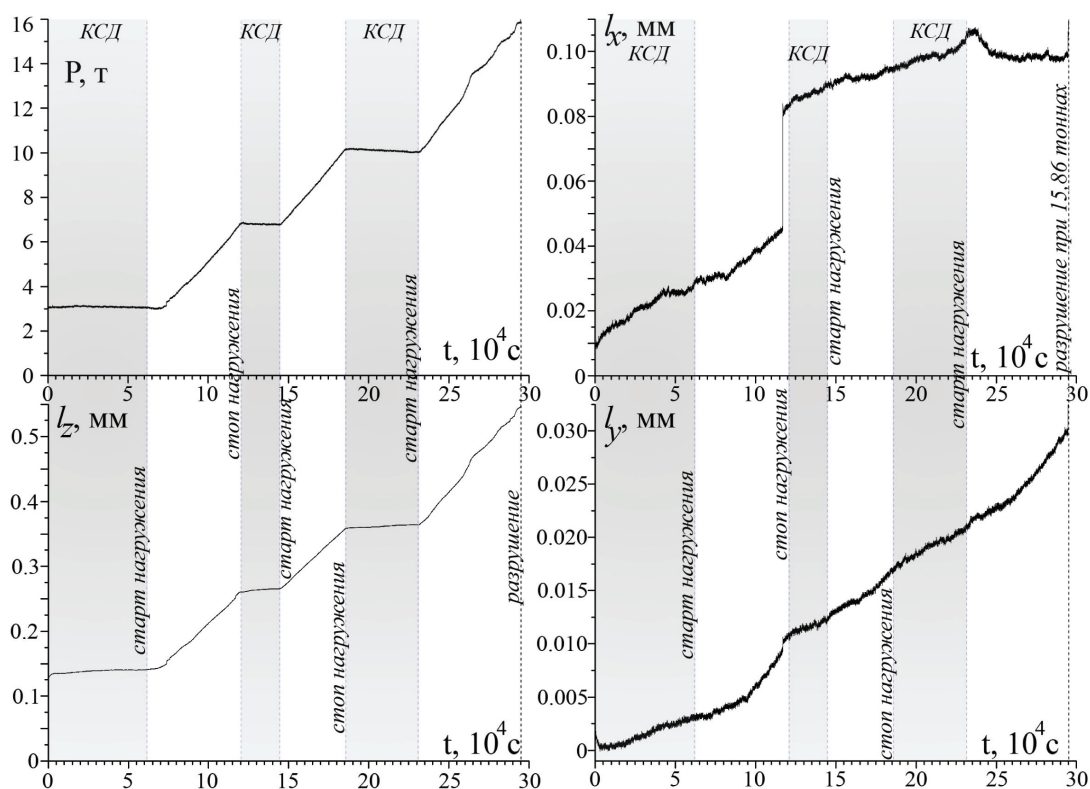


Рис. 1. Изменение нагрузки и удлинений (укорочений) образца в трех направлениях (x, z, y).

персонального компьютера в автоматическом режиме [3]. В качестве датчиков, регистрирующих деформацию (продольную и поперечную) и нагрузку, применялись линейные дифференциальные трансформаторы LVDT, предназначенные для измерения линейных перемещений. Использовались датчики LVDT фирмы Lucas Shaevitz двух типов: MHR 010 и MHR 050. Коэффициенты преобразования датчиков следующие: MHR050 – $k=0,5034$ мВ/мкм, MHR010 – $k=0,9469$ мВ/мкм. Коэффициент преобразования нагрузки получен для датчика MHR050 и составил $k=64,64$ мВ/т. При обработке сигналов используется ФНЧ Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 0,25 Гц, созданный по схеме с МОС [4, 5]. Частота среза выбрана согласно теореме Котельникова из расчета того, что частота дискретизации составляет 1 Гц.

Для испытаний были подобраны образцы мрамора в форме параллелепипеда с размерами $100 \times 50 \times 25$ мм³. Мрамор как модельный материал хорошо подходит для испытаний, прежде всего, как псевдопластический материал, который подвергается полухрупкому разрушению.

Воздействие электрическими импульсами осуществлялось при подаче на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца. Эксперименты проводили в условиях действия только механической нагрузки, а также при воздействии внешнего источника ЭМ поля. В качестве модельных источников ЭВ использовались генератор прямоугольных импульсов Г5-54 и конденсаторный разрядник (КР), создающий электрические импульсы с крутизной фронта порядка 1 мкс и пиковым напряжением порядка 1 кВ.

В случае воздействия КР применялась схема 10 разрядов через 15 секунд, в целом около 2,5 минут. Амплитуда импульсов выбиралась стабильно 800 В. Для Г5-54 устанавливались следующие параметры импульсов: положительная полярность, частота 2 кГц, длительность 60 мкс, амплитуда 50 В. Схема эксперимента включала в себя как этапы квазистационарного деформирования (КСД), так и этапы с ростом нагрузки со скоростью нагружения 300 кг в час.

Результаты тензометрических измерений. Проанализируем эксперимент, в котором

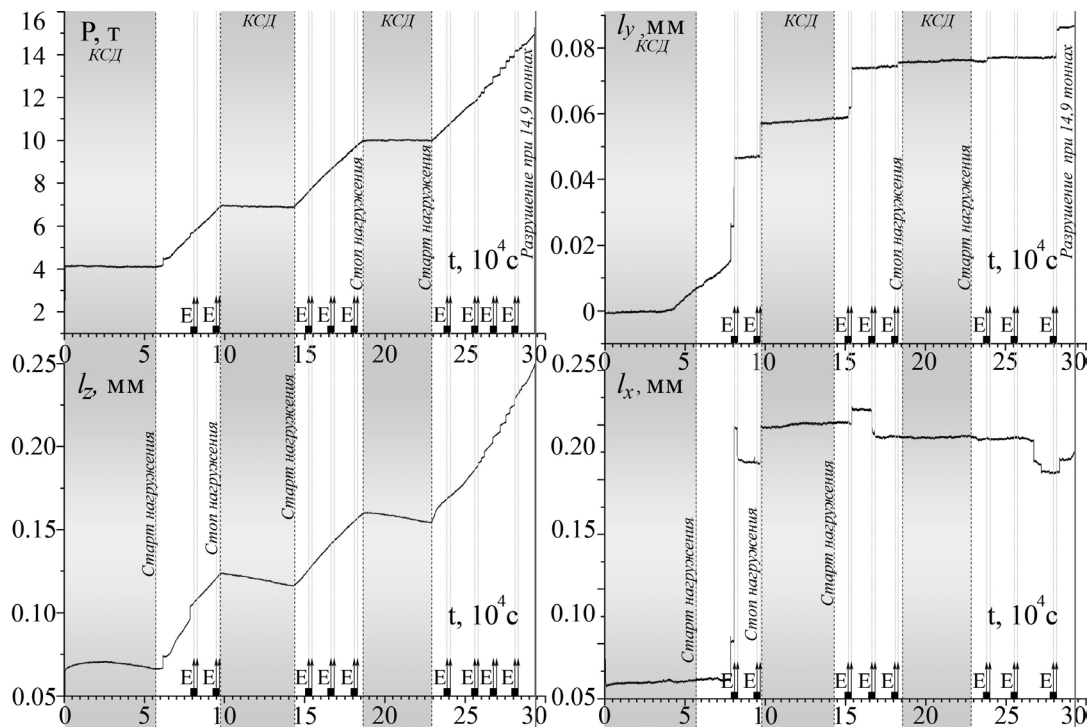


Рис. 2. Изменение нагрузки и удлинений (укорочений) образца в трех направлениях (y, z, x).

на образец действовала только механическая нагрузка. Были реализованы по три периода квазистационарных и с ростом нагрузки 300 кг в час. На рис. 1 показаны графики изменения нагрузки и удлинений в течение всего эксперимента. Эксперимент длился 81,86 часа. Как видно из диаграмм, кривая продольной деформации повторяет ход нагружения. Небольшой прирост значения продольного укорочения и некоторая инертность рычага прессы в период квазистационарного деформирования (КСД) приводит к небольшому уменьшению действующей нагрузки. В ходе увеличения нагрузки продольная деформация также увеличивается.

Поперечные размеры образца менялись плавно, также демонстрируя их рост. Однако в двух случаях были отмечены резкие изменения размера образца в направлении X. Первый раз при нагрузке 6,5 т, а второй – при нагрузке 10 т произошло колебание размера на 0,01 мм в течение пяти с половиной часов с возвратом к прежнему значению уже при нагрузке 11,25 т. Смещение по X достигло максимального значения в 0,11 мм, а по Y всего на 0,03 мм. Продольное укорочение в конце эксперимента было зафиксировано на уровне 0,54 мм. Эксперимент с энерговоздействием (ЭВ) включал в себя те же

ступени нагружения и КСД, что и в первом эксперименте. Для ЭВ были использованы генератор Г5-54 и КР, работавшие в комбинации: после каждого из 2-х получасовых отрезков работы Г5-54 подавались 10 разрядов (всего ЭВ продолжалось 1 час). Разрушающая нагрузка составила 14,9 т. Всего эксперимент длился 81,49 часа. На рис. 2 показаны результаты эксперимента.

Наблюдается некоторое уменьшение значения l_z в режиме КСД при практически не изменяющейся нагрузке и поперечных размерах. В ходе увеличения нагрузки l_z также увеличивается. Все девять сеансов были проведены в режиме нарастающей нагрузки и на l_z не оказали влияния. В то же время очень интересные данные были получены для смещений в поперечных направлениях. В отличие от первого эксперимента изменение данных параметров характеризовалось резкими скачками, причем как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения значений. Примечательно, что все значимые вариации с точностью совпадают с первой или второй сериями разрядов. Реакция на ЭВ была разной, например, в первом сеансе на первую серию разрядов увеличилась на 0,14 мм, а через полчаса на вторую серию ответила снижением на 0,02 мм, при этом от l_y реакции не последо-

вало вовсе. Вторая серия разрядов второго сеанса повлияла на увеличение I_y и I_x на 0,01 и 0,02 соответственно. Третий сеанс затронул обе компоненты, причем I_y откликнулась на оба сеанса увеличением значения, а I_x только на последние разряды, но также увеличением. В четвертом сеансе первая серия разрядов вызвала снижение значения смещения по I_x , а на I_y ЭВ не повлияло вообще. Пятый и шестой сеансы были похожи: оба вызвали небольшое увеличение I_y и не вызвали отклика в I_x , с той лишь разницей, что в пятом сеансе отклик вызвала первая серия разрядов, а в шестом вторая. Единственный в эксперименте сеанс №7, который не вызвал каких-либо изменений в значениях смещений проводился на нагрузке 11,535 тонн. В восьмом сеансе I_x уменьшилась на 0,012 мм, а I_y не менялась. В последнем девятом сеансе на первую серию разрядов увеличилось только значение I_y , а на вторую только I_x , причем оба на величину порядка 0,01 мм. С учетом полученных ранее результатов эксперимента с влиянием только КР заметна явная роль периодического воздействия Г5-54, которая заключалась, скорее всего, в некоторой подготовке материала перед воздействием мощных разрядов. Данный процесс (период влияния Г5-54), по-видимому, способствовал повышению чувствительности материала к более мощному ЭВ в плане появления предпосылок к возникновению краевых дефектов и дальнейшему их выходу на поверхность после разрядов.

Результаты измерений акустической эмиссии. Рассмотрим результаты, полученные по данным регистрации АЭ образца, на который не оказывалось ЭВ. АЭ появлялась после 7,4 т, постепенно нарастала, и в районе 11 тонн резко увеличивалась до 80 событий в секунду. Эта кратковременная активизация заканчивалась резким спадом и при переходе в КСД активность стремилась к нулю. В период нарастающей нагрузки АЭ активизировалась достаточно быстро в отличие от предыдущего раза, выходила на некоторый уровень, однако более 0,15 событий в секунду не превышала. После перехода в КСД наблюдался характерный спад. Перед третьим периодом растущей нагрузки её значение составляло чуть больше 10 т, а активность АЭ была близка к нулю. Вновь начавшая расти нагрузка, довольно быстро вызвала активность порядка 0,2 события в секунду, а затем и кратковременный всплеск до 0,6 событий. Спустя 5 часов наступало разрушение при максимальном количестве регистрируемых АЭ 131 в секунду.

Обратимся теперь к результатам обработки АЭ в эксперименте с ЭВ. Первым двум сеансам предшествуют активизации АЭ, которые мы называем спонтанными, так как они не связаны с ЭВ. Третий сеанс также проходил после сильного всплеска активности АЭ, однако с некоторой задержкой всё же виден некоторый кратковременный прирост. Такой же эффект, то есть активизация с задержкой, наблюдался и после четвертого сеанса, однако амплитуда прироста была заметно выше. Пятый сеанс характеризовался приростом активности уже во время действия Г5-54, а при подаче первой серии разрядов наблюдался дополнительный всплеск активности. Самыми значимыми по результативности в откликах стали два последних сеанса с увеличением активности в 4 и 40 раз соответственно.

Интерпретация данных лабораторного моделирования. Сопоставляя результаты измерений деформаций и акустического излучения можно отметить следующие особенности деформирования образцов в режимах КСД и постоянного роста нагрузки. В режиме КСД нагрузка постоянна, а продольная деформация может иметь тенденции, как к небольшому росту, так и к уменьшению. Например, в случае испытания образца №1 (без ЭВ) I_z в КСД слегка увеличивалась, однако и поперечные размеры в этом режиме также росли. В эксперименте с ЭВ имел место эффект понижения I_z в КСД. Отметим, что ЭВ не оказывало влияние на I_z , зато в 90% сеансов оно отразилось на изменениях значительной поперечных смещений. Было отмечено, что ЭВ при длительном КСД ближе к его концу не производит эффекта, что отмечено в работе [1], где воздействие на образец обычно начиналось с задержкой после пригрузки образца не более 2-х часов. Нас же интересует режим нарастающей нагрузки. Здесь следует обратить внимание на образец, который не подвергался ЭВ. Видно, что, начиная с 7,2 т, происходит медленный рост активности АЭ (в течение 10 ч), который затем очень быстро сменяется фазой быстрого выделения акустической эмиссии, когда активность увеличивается в сотни раз. Быстрая фаза длилась порядка 25 минут, причем по её завершении активность стала стремиться к нулю. В течение эксперимента дважды после КСД наблюдались подобные сценарии, однако второй раз образец не успевал войти в быструю фазу (очередной КСД начался), а в третий раз, по-видимому, тот же очаг при переходе в быструю фазу уже не выглядел столь впечатляюще по уровню активности АЭ. Итак, гипотетически, при разрушении

образца в условиях сдавливания без смазки с формированием поверхностей разрыва в виде конуса указанные процессы хорошо отражают развитие магистрального разрыва начинающегося в вершине конуса (где и сконцентрированы максимальные касательные напряжения) и распространяющегося по двум плоскостям к вершине образца. При формировании обеих плоскостей образец теряет устойчивость и разрушается. При отсутствии КСД можно наблюдать два характерных этапа формирования магистрального разрыва, отраженных в АЭ: очаговую зону в вершине конуса и какое-то количество плоскостей разрушения, прорастающих от очага, а также заключительный акт выхода сформированных плоскостей к поверхности (разрушение). Какие изменения происходят при наложении на процесс деформирования образца внешних ЭМ полей? В эксперименте с ЭВ первая очаговая часть макро-разрыва начинает формироваться при нагрузках близких к 7 т и проходит по тому же сценарию, и при этих нагрузках ЭВ ещё не применяется. А вот начиная с нагрузок, близких к 70% разрушающей, когда подходит время формирования второй части разрыва (плоскостей разрушения) ЭВ становится эффективным и вызывает несколько “волн” активизации АЭ по уровню раз в 15–20 превышающих аналогичные в первом эксперименте. Сам процесс разрушения не молниеносный как в случае с образцом без ЭВ, а проходит в течение нескольких десятков минут с устойчивой активностью 30–40 событий в секунду, завершаясь разрушением с приростом активности АЭ до 90–100 событий. Следует отметить, что после окончания развития очаговой стадии разрушения (область накопления большого количества микроразрывов) попытки применить ЭВ не вызвали откликов, среда полностью успокаивалась до начала новой стадии. На второй стадии формирования магистрального разрыва хорошо выделяются несколько “волн” усиления интенсивности АЭ инициированных ЭВ. Одинаковые образцы из одного и того же материала разрушились при 15,86 и 14,9 т соответственно. Наиболее высокие прочностные свойства оказались у образца, который не подвергался ЭВ. Только у него была самая высокая степень текучести, отраженная в максимальном укорочении в направлении сжимающей нагрузки (около 0,5 мм). Следует также отметить равномерное, но непрерывное увеличение поперечных размеров. В данном случае налицо выраженная дилатансия и соответственно высокая способность к сопротивлению сжимающему усилию вследствие не-

прерывной переупаковке структуры. В целом же концентрация выделенной акустической энергии пришлось на два коротких периода. Образец с ЭВ показал стабильный прирост продольной деформации. Хотя максимальное её значение и оказалось вполтину меньше чем у первого образца, но за счет более значимых изменений поперечных компонент и постоянному переуплотнению (колебания этих компонент) под действием ЭВ разрушающая нагрузка оказалась сопоставимой.

Таким образом, результаты экспериментов продемонстрировали, что эффект от наложения внешних комбинированных воздействий обладает достаточным потенциалом для модификации процесса накопления дефектов в образцах геоматериалов, находящихся в состоянии неупругого деформирования, но не слишком близко к критическим условиям. Реакцией породных образцов на ЭВ является кратковременный прирост активности АЭ. Чувствительность АЭ к ЭВ проявляется при нагрузках больше 70%. Образец не откликается повышением активности в периоды после завершения первых двух этапов. Также чувствительность минимальна незадолго перед последним этапом (после нагрузки величиной около 95% разрушения). Поведение компонент деформаций образца определяет характер разрушения и его прочностные свойства. Отмечено, что ЭВ влияет на характер как поперечных компонент деформации, так и на продольную компоненту. С точки зрения влияния ЭВ на АЭ и объемную деформацию можно говорить о высокой эффективности воздействия внешних электромагнитных полей на кинетику трещинообразования в нагруженных породах.

Следует подчеркнуть, что в становление нового научного направления, связанного с энергетическими воздействиями на геосреду, большой вклад был внесен Ю.А. Трапезниковым ещё в конце 80-х годов прошлого столетия. Именно тогда по его инициативе в ИФиМГП НАН КР были проведены первые лабораторные эксперименты на образцах мрамора (пластификация при постукивании).

Работы выполнены при частичной поддержке РФФИ в рамках проекта №10-05-00231-а.

Литература

1. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. №10. С. 1678–1689.
2. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988.

Активный геофизический мониторинг, физическое моделирование

3. *Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г.* Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. *Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // *Физика Земли*. 2006. №10. С. 43–50.
5. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
6. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
7. *Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Zakupin A.S., et al.* Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // *Annals of Geophysics*. 2004. Vol.47. N 1. P.65–72.