

УДК 550.34 (575.2) (04)

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Д.К. Шатемиров – ст. научн. сотрудник,*К.Т. Тилегенов* – ст. научн. сотрудник

Comparative analysis is presented of plastic and brittle relaxation of rock strain by analogy with plastic and brittle destruction. Strain hardening in the plastic mechanism of relaxation was observed which was a function of time.

Одним из основных механизмов пластической деформации кристаллических тел, в частности, горных пород, является скольжение [1]. Скольжение начинается тогда, когда соответствующая компонента напряжения сдвига достигает некоторой определенной критической величины в данной плоскости (закон Шмида). Деформация кристалла, обусловленная скольжением, не является однородной. Смещения при сдвиге обычно происходят вдоль нескольких, заметно отстоящих друг от друга плоскостей скольжения, в то время как те части кристалла, которые лежат между этими плоскостями, почти не подвергаются деформации.

Другим видом пластической деформации является двойникование, наблюдаемое в ряде кристаллов, имеющих плотноупакованную гексагональную, или объемноцентрированную кубическую структуру. При двойниковании незначительные смещения испытывает каждая из многочисленных кристаллографических плоскостей. После такой деформации деформированная часть кристалла оказывается зеркальным отражением недеформированной части.

Обычно, в результате пластической деформации, прочность кристаллического материала возрастает. Это явление называется деформационным упрочнением или наклепом. Так, при деформировании мрамора, его прочность в длительных экспериментах возрастала почти в два раза, по сравнению с кратковре-

менными испытаниями [2]. Гранит, деформирующийся хрупко, упрочнялся всего на 15÷20%. Благодаря упрочнению количественные характеристики прочности гранита и мрамора при длительных испытаниях оказались примерно одинаковыми, около 200 МПа.

Опыты на металлах показывают, что в процессе деформации плотность дислокаций возрастает примерно с 10^8 см^{-2} до 10^{11} см^{-2} , то есть в 1000 раз. Исследователи считают, что это является основной причиной увеличения прочности [1]. Важным фактором, способствующим деформационному упрочнению, является не только высокая плотность дислокаций, а их взаимное расположение.

Целью настоящей работы является выявление особенностей акустической эмиссии (АЭ) при релаксации напряжений в хрупких и пластичных горных породах, испытывающих различную степень деформационного упрочнения.

Опыты по релаксации горных пород в условиях одноосного сжатия проводились на механической жесткой конструкции ВНИИ – 78У03 [3]. Пресс имел жесткость $2 \times 10^{10} \text{ Н/м}$, что давало возможность испытывать на релаксацию породы в широком диапазоне упругих и прочностных свойств.

Эксперименты оканчивались за пределом прочности, но испытываемые образцы не доводились до полной потери несущей способности. При этом гранитные образцы были рассе-

чены преимущественно вертикальными трещинами по всей длине. Мраморные образцы распухали в центральной части, наблюдались явные следы системы линий Чернова-Людерса.

При проведении эксперимента контролировались величины нагрузки, продольной и поперечной деформаций, акустическая эмиссия. Измерение и регистрация экспериментальных данных осуществлялись ежесекундно в автоматическом режиме измерительно-вычислительным комплексом, включающим крейт КАМАК и компьютер. В качестве первичных преобразователей использовались упругие динамометр и экстензометры с наклеенными тензорезисторами. Аналоговые сигналы с первичных преобразователей усиливались и оцифровывались с последующей записью на дисковом накопителе компьютера, где происходило их накопление и обработка.

В качестве твердого, хрупкого материала был выбран гранит, а как более вязкий или пластичный – использовался мрамор. Мрамор является мономинеральной породой, что обусловило его более высокую пластичность по сравнению с гранитом.

Розовый гранит (месторождение Кыртабылга, КР) характеризуется средне-, крупнозернистой, по форме минералов – гипидеоморфно-зернистой структурой. Текстура породы массивная. Минеральный состав: кварц – 30%, калиевый полевой шпат – 25%, плагиоклазы кислого состава типа альбит – 30%, темноцветные минералы, биотит – 2–3%, роговая обманка – 5%. Акцессорные минералы представлены петитом, магнетитом и ильменитом (не превышает 1–2%). Вторичные изменения: зерна кварца слегка трещиноваты, полевые шпаты сильно пелитизированы, представлены ортоклазом и микроклином. Пористость гранита 1,5–2%. Поры вторичного выщелачивания, располагающиеся внутри зерен роговой обманки и биотита, 0,3–0,5 мм.

Мрамор (Чичкан) имеет кристаллическую структуру кальцита [4] аналогичную гранецентрированной кубической структуре NaCl, но сжатой вдоль одной из диагоналей куба до 76,66% своей первоначальной длины, а Na и Cl замещены соответственно Ca и Co_3 . Порода состоит из ксенобластовых зерен кальцита, размером 0,5–3 мм. Встречается незначительная при-

месь (0,5–1%) глинистого вещества. Для зерен кальцита характерны полисинтетические двойники. Контакты между зернами кальцита удлиненные, реже вогнуто-выпуклые. Порода трещиноватая. Трещины открытые, различной протяженности. Короткие – расположены внутри зерен, вдоль полисинтетических двойников, или между зернами кальцита, а протяженные следуют чрез весь шлиф, рассекая зерна кальцита. Форма трещин слабоизвилистая, участками прямолинейная. Ширина трещин 10–20 микрон. Плотность отрывных трещин – 55 1/м, трещинная проницаемость – 5,1 мд. Образцы имели правильную цилиндрическую форму высотой $L = 60$ мм, диаметром $D = 30$ мм.

Условно-мгновенная прочность мрамора при одноосном сжатии ~ 100 МПа, гранита ~ 170–180 МПа. [2]. Как показали опыты, при испытании на обычных гидравлических машинах с малой жесткостью, мрамор деформируется упруго с небольшим изменением объема образцов. Максимальное уплотнение составляет ~ 0,1% при нагрузках приблизительно 2/3 от $\sigma_{\max}$. Разрушение мрамора происходило спокойно, по единственной плоскости макросдвига. Разрыхление материала, при максимуме несущей способности ~ 0,11% от первоначального объема образца. В подавляющем большинстве случаев при разрушении образцов мрамора, образуется только два осколка, форма которых свидетельствует о вязком, сдвиговом характере разрушения. Гранит деформировался упруго, разрушался хрупко, с интенсивным разлетом осколков.

Отмеченные различия объясняются как неодинаковой способностью этих материалов накапливать упругую потенциальную энергию при нагружении, так и различной скоростью ее высвобождения при образовании дефектов. Последнее в значительной степени определяет особенности генерации АЭ.

Механизм освобождения энергии при двойниковании. Процесс двойникования обусловлен тем, что общая деформация элемента должна быть сравнима со смещением отдельных элементов [5]. Двойники образуются с большой скоростью. Отмечено, что сигналы имеют вид импульсов, длительностью порядка 10^{-6} с. Аналогичные результаты были получены при деформировании кристаллов алюми-

ния. Излучение АЭ сопровождает как возникновение, так и исчезновение двойников [6, 7], причем импульсы АЭ носят взрывной характер и обладают энергией, значительно большей, чем при деформации скольжением. Смещение в волне напряжения, возникающей при двойниковании, составляет до 0,1 ангстрем.

Шофилдом установлено соответствие акта двойникования отчетливой вспышке АЭ [5]. При этом, между вспышками, соответствующими образованию двойников, наблюдались низкоэнергетические импульсы типичные для развития линий скольжения. Замечено, что случаи крупного двойникования сопровождались иницированием эмиссионных лавин короткой длительности, что обусловлено, по мнению автора, с развитием линий скольжения.

Доказано, что начало двойникования при деформации отожженного поликристаллического цинка технической чистоты приводит к возрастанию интенсивности АЭ примерно на порядок, по сравнению со скольжением [8]. Резкий рост интенсивности АЭ непосредственно перед разрушением можно отнести за счет начала трещинообразования [2].

Поскольку пластическая деформация мрамора происходит в основном за счет дислокационных механизмов, процесс релаксации в мраморе, может быть, обусловлен описанным выше механизмом.

Механизм деформирования гранита, в котором основным порообразующим компонентом является кварц, иной. Однозначные данные о пластическом поведении кварца в экспериментальных условиях в настоящее время отсутствуют [4]. Кварц остается упругим вплоть до разрыва сплошности. Возникновение двойников под действием давления в кварце, сопровождающееся вращением, происходит без видимых следов скольжения, поэтому его можно рассматривать как особый тип кристаллического скольжения. Эта “вращательная пластичность” отличается от трансляционного скольжения и простого деформационного двойникования (кальцитовый тип), подобного тому, который наблюдается в кристаллах соли и мрамора, и может быть названа “пластичностью кварца”. Кварц является единственным минералом, в котором установлено вращательное кристаллическое скольжение.

Основным механизмом разрушения гранита является образование трещин отрыва и сдвига различного размера и их комбинации. Этим объясняются особенности механизма пластического деформирования и хрупкого разрушения гранита.

Баланс хрупких и пластических свойств этих материалов определяет и различие параметров АЭ, сопровождающей их деформирование. Такими параметрами являются: характеристики одиночных сигналов АЭ, общее количество импульсов, средний уровень активности, энерговыделение, величины средних и пиковых амплитуд и их разброс.

В силу структурной неоднородности и анизотропии свойств напряжения в материале распределяются неравномерно. При достижении в некоторой области нагруженного тела предельного значения напряжения, происходит разрыв внутренних связей и частичное снятие (релаксация) напряжения. Некоторая доля накопленной энергии излучается в виде упругого импульса – сигнала АЭ.

Существует ряд теоретических моделей АЭ, уточняющих и детализирующих этот процесс. Согласно одной из них, при энергии теплового шума в единичном интервале частотного диапазона, при комнатной температуре равной $E/\Delta f = 4 \times 10^{-21}$ Дж/Гц, энергии дислокации – 10^{-16} – 10^{-17} Дж, возникновение плоского дефекта кристаллической решетки типа двойника связано с изменением энергии порядка 10^{-3} Дж.

Форма импульсов АЭ, возникающих в результате перестройки структуры, зависит от природы процесса и материала [9]. Различают три типа сигнала АЭ. Первый, с крутым фронтом и быстрозатухающими колебаниями, второму соответствует процесс снятия локальных напряжений путем отрыва (рис. 1). Он происходит быстро, за время порядка 10^{-13} с. Для сдвига характерны более пологий фронт и медленное затухание сигнала (рис. 1). Это второй тип сигналов. Оба типа сигналов относятся к релаксационному. Они характерны для процессов возникновения и развития трещин и движения групп дислокаций. Третий тип – импульсов акселерационный. Он возникает, когда дислокации противоположного знака, сближаясь, аннигилируют или выходят на поверхность кристаллов. Эти процессы происхо-

дят с ускорением, отсюда название импульсов этого типа. Энергия процесса аннигиляции единичных дислокаций порядка 10^{-18} – 10^{-16} Дж, длительность импульсов – 10^{-11} с, ширина спектра – сотни МГц. Другие дислокационные источники (в частности источник Франка-Рида) имеют большую длительность и энергию (до 10^{-6} Дж.).

К параметрам одиночных сигналов акустической эмиссии относятся форма сигналов, их длительность, амплитуды, частотные характеристики и др. В качестве иллюстрации приведем записи волновых форм сигналов АЭ (рис. 1, 2). Приведенные осциллограммы свидетельствуют, что сигналы АЭ у гранита и мрамора имеют существенные различия как по форме, так и по количественным характеристикам. Амплитуды сигналов АЭ гранита в среднем превышают амплитуды сигналов мрамора на два порядка, в то время как длительность на порядок больше у мрамора.

Энергия сигнала АЭ вычисляется как

$$W_{АЭ} \sim A^2 \times B, \quad (1)$$

где A – амплитуда сигналов в вольтах; B – длительность в секундах.

С учетом коэффициента усиления

$$W_{АЭ} \sim [(A/2000) \times 10^{-6}]^2 \times B \times 10^{-6} \text{ Дж.} \quad (2)$$

Расчет показывает, что средняя мощность сигналов АЭ в граните около 10^{-15} Дж, в то время как в мраморе – 10^{-16} Дж.

Общее количество сигналов АЭ, зарегистрированных для мрамора, – 8×10^5 , время регистрации – 35×10^5 с, средняя активность АЭ при этом – $0,2 \text{ с}^{-1}$. Для гранита эти значения равны $0,9 \times 10^5$, 18×10^5 с, $0,05 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Таким образом, энерговыделение каждого отдельного сигнала АЭ гранита превосходит таковое у мрамора на порядок, а средняя активность их меньше на порядок, следовательно, суммарное энерговыделение примерно одинаково. Сброс энергии при релаксации у гранита происходит реже, но более крупными порциями, нежели у мрамора. Для мрамора максимальная активность сигналов АЭ – $2,5 \text{ с}^{-1}$, минимальная – $0,1 \text{ с}^{-1}$; для гранита максимум – 200 с^{-1} , минимум – $0,001 \text{ с}^{-1}$.

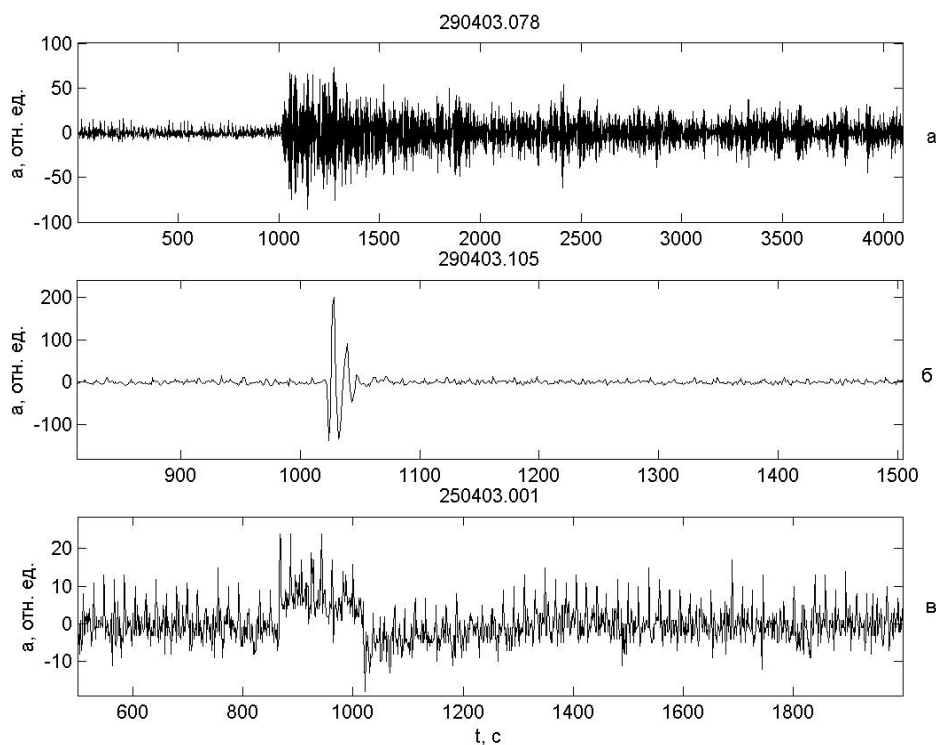


Рис. 1. Волновые формы сигналов акустической эмиссии при деформировании гранита

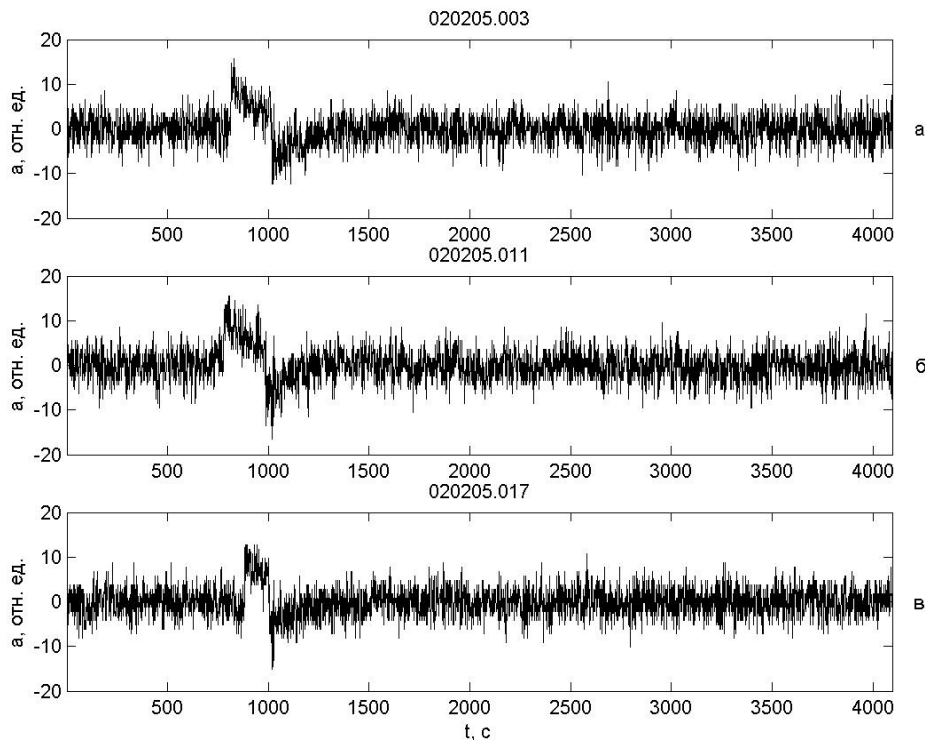


Рис. 2. Формы сигналов АЭ для мрамора

Максимальная величина упрочнения для гранита составила 20%, для мрамора 100%, что объясняется рядом факторов. Прежде всего тем, что мономинеральный мрамор является более однородной и пластичной породой, склонной к деформационному упрочнению, по сравнению с резко гетерогенным, хрупким гранитом. Прочность же гранита определяется, скорее всего, прочностью наиболее слабого элемента в объеме образца.

Литература

1. Кимтель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978.
2. Мансуров В.А., Тилегенов К.Т., Манжиков Б.Ц. Изучение горных пород в натурных и лабораторных условиях при разных видах и условиях напряженного состояния, широкой вариации скоростей нагружения, с учетом одновременного действия жидкой и газообразной фаз и запрещенных деформаций: Отчет лаборатории экспериментальных методов разрушения горных пород / ИФиМГП АН Кирг. ССР. – Фрунзе, 1983.
3. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на большой глубине. – М.: Недра, 1986.
4. Минералогическая энциклопедия. – Л.: Недра, 1985.
5. Мелехин Б.П., Минц Р.И., Куглер А.М. Влияние механизмов пластической деформации цинка на акустическую эмиссию // Изв. вузов. Сер. Цветная металлургия. – 1971.
6. J.H., Skimin M., Schockeu W. Ultrasonic Observation of Twinning in Tin // Physical review. – 1948. – Vol. 73. – № 10.
7. Schofield B.H. Research on the Sources and Characteristics of Acoustic Emission // Acoustic Emission. – ASTM STP. – 1972.
8. Минц Р.И., Кортков В.С., Мелехин В.П. Влияние механизма пластической деформации на акустическую и экзоэлектрическую эмиссию // Металлофизика. – Киев, 1973. – Вып. 4.
9. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля. – М.: Высшая школа, 1991.