

УДК 552.2

В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин

**ДИНАМИКА КОМПЛЕКСА ФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД
ПЕРЕД ИХ РАЗРУШЕНИЕМ ПРИ ПОСТОЯННОЙ
СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ**

Динамика комплекса физических параметров образцов горных пород перед их разрушением при постоянной скорости деформации

При разработке рудных месторождений шахтным способом происходит рост нагрузки на оставляемые в шахтах целики и окружающий массив горных пород. Этот процесс достаточно хорошо можно аппроксимировать одноосным сжатием с постоянной скоростью деформации. Имеющиеся неоднородности, типа тектонических нарушений, блоков различной прочности и жесткости, которые создают зоны концентрации напряжений, имитируются созданием зон концентрации напряжений.

При подготовке горных ударов и сейсмических событий в шахтах и рудниках происходят процессы, которые изменяют свойства пород в пределах формирующихся неоднородностей [1-12]. Своевременное выявление этих неоднородностей позволит предсказать опасные события и уменьшить ущерб, вызываемый ими. В природных условиях изменения свойств зачастую охватывают не весь массив, а только отдельные участки. При физическом моделировании этих процессов, изменения свойств тоже должны охватывать не весь образец, а быть локализованы в относительно небольших объемах. В данной

работе делается попытка выявить наиболее характерные черты предвестниковых изменений акустических, деформационных и электрических параметров образцов в условиях постоянной скорости их деформирования.

Исходя из этих предпосылок, были проведены эксперименты по деформированию с постоянной скоростью образцов доломита на установке INOVA-100. Рассмотрим результаты одного из них. Внешний вид образца с датчиками для измерения локальных деформаций и электродами для измерения сопротивления показан на рис. 1.

Размеры образца 100 на 50 на 75 мм. Для создания зоны концентрации напряжений, то есть, зоны, в которой должно было произойти контролируемое разрушение, в образце были просверлены два сквозных отверстия диаметром 4 мм на расстоянии 10мм друг от друга. Сжатие образца создавалось в вертикальном направлении с постоянной скоростью деформации $(\Delta\varepsilon/\Delta t) 4 \cdot 10^{-7}$ 1/сек. Эксперимент продолжался вплоть до потери несущей способности образца и длился в течение 4 часов и 45 минут (17055 секунд). На продолжении всего эксперимента с высокой

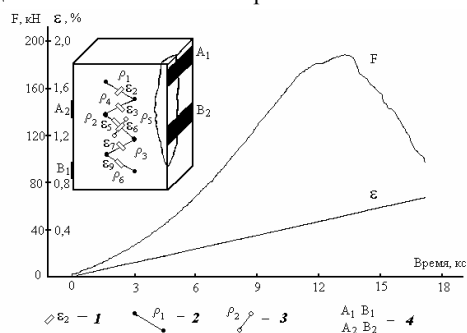


Рис. 1. Схема размещения датчиков на образце и изменения нагрузки и деформации при деформировании его с постоянной скоростью: 1 - датчики измерения локальных деформаций; 2 - приемные электроды измерения электрического сопротивления; 3 - приемные электроды измерения электрического сопротивления на базе сквозных отверстий; 4 - питающие электроды

точностью проводилась регистрация общей продольной деформации ϵ образца и приложенного к образцу усилия F (рис. 1), а также изменения электрического сопротивления и локальных деформаций на различных участках образца и активность сейсмоакустической эмиссии N образца в различных частотных диапазонах.

Пространственно-временные изменения электрического сопротивления образца измеряли по четырехэлектродной схеме при помощи вариометра MSK-01 [13, 14] совместно с В. Стопинским (Институт Геофизики Польской Академии Наук). Причем было подготовлено два питающих диполя: $A_1 - B_1$ и $A_2 - B_2$ (рис. 1). Ток пропусклся через образец в том направлении, которое обеспечивало большую величину регистрируемого полезного сигнала на приемных электродах. Для улучшения условий прохождения тока, образец насыщался водой в течение нескольких суток перед экспериментом. Весь этот комплекс методических мер позволил получить в процессе проведения эксперимента практически непрерывный временной ряд значений вариаций электрического сопротивления на шести локальных участках образца.

Измерения локальных деформаций на различных участках образца как показано на рис. 1 были совмещены с измерениями изменений электропроводности. В качестве датчиков локальных деформаций использовались тензорезисторы с базой 5мм. Регистрация изменений локальных деформаций проводилась ежесекундно от начала приложения нагрузки к образцу и до конца эксперимента или разрыва соответствующих датчиков.

Для наблюдения за процессами образования трещин проводили регистрацию активности сейсмоакустической эмиссии. Для этой цели на образце были установлены два пьезокерамических датчика – акселерометра. Один был размещен в центральной части об-

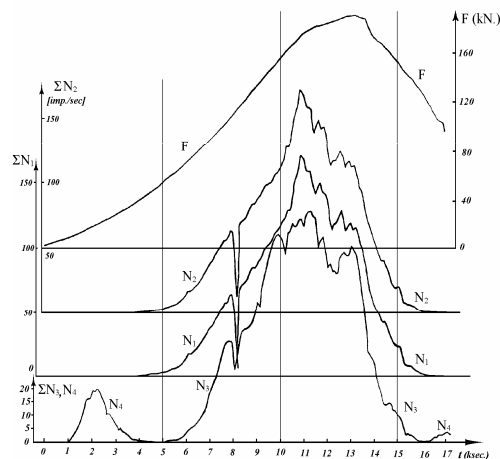
разца между концентраторами напряжений, а второй слева от первого в верхней части образца. Оба датчика сейсмоакустической

Рис. 2. Изменения интенсивности и частотного состава акустической эмиссии при деформировании образца с постоянной скоростью

эмиссии были установлены на противоположной стороне образца по отношению к стороне, где были размещены тензорезисторы и электроды. Сейсмоакустические сигналы, генерируемые при образовании трещин в различных участках образца, поступали к датчикам, преобразовывались в электрический сигнал, который затем усиливался и фильтровался по амплитуде и по частоте.

Предварительная обработка этих сигналов позволяла разделить всю совокупность зарегистрированных сейсмоакустических импульсов на четыре части. Первая (N_1) – это количество импульсов, возникших в центральной части образца и имеющих частоту от 30 КГц до 1 МГц. То есть, это практически весь регистрируемый спектр сигналов (рис. 2). Вторая (N_2) – количество импульсов из верхней части образца с частотой 30 КГц – 1 МГц. Третья (N_3) – количество импульсов из центральной части образца с частотой от 100 до 300 КГц (средние частоты) и четвертая (N_4) – количество импульсов из центральной части образца с частотой 30 – 100 КГц (низкие частоты).

Полученные, в процессе деформирования образца, данные о локальных изменениях электропроводности и деформации, позволяют по характеру (морфологии) пространственно-временных изменений выделить три различающиеся между собой участка образца. Одним из них является верхний участок образца, изменения сопротивления и деформации которого показаны на рис. 3. Характерной чертой их является значительная дисперсия, резкая изломанность, наличие скачко-



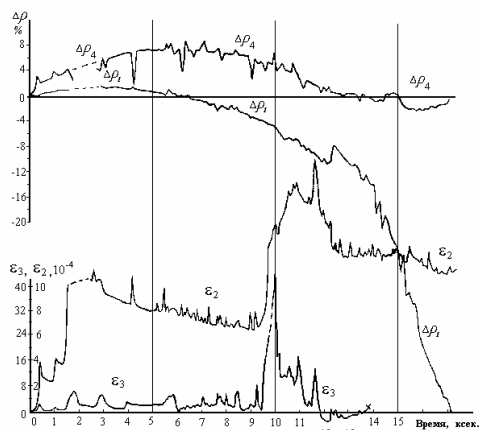


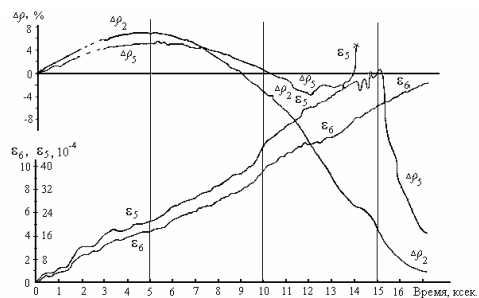
Рис. 3. Изменения электрического сопротивления и деформации локальных участков верхней части образца

образных изменений. На этом участке во время эксперимента происходило интенсивное шелушение поверхности образца. Развивались трещины отрыва отдельных мелких фрагментов материала от основной массы образца. Частично наблюдались эти явления визуально во время проведения эксперимента. А позже, были выявлены при тщательном визуальном осмотре образца после завершения эксперимента. Как показано на рис. 1 в этой же области произошел откол правой угловой части образца.

Центральный (второй) участок образца был наиболее хорошо обеспечен наблюдениями. Изменения сопротивления, локальных деформаций и акустической эмиссии этого участка представлены на рис. 4. Сопротивление в начале роста нагрузки на об-

Рис. 4. Изменения электрического сопротивления и деформации локальных участков средней части образца

разец увеличивалось, так же как и в верхней части образца, что может быть связано с закрытием или разрушением крупных для дан-

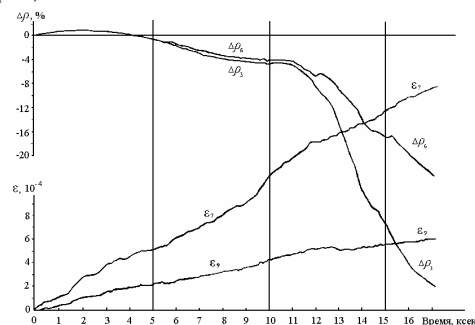


ного образца токопроводящих каналов. Это подтверждается увеличением активности эмиссии акустических сигналов в диапазоне низких частот (N_4 , рис. 2.), которое сопровождается подвижки относительно крупных частиц или берегов трещин. Локальные деформации в начальный период роста нагрузки на образец носят знакопеременный характер на фоне общей тенденции к увеличению деформации сжатия. В дальнейшем они продолжают увеличиваться, причем, временами происходило значительное увеличение скорости деформации.

Сопротивление локального участка образца ρ_2 (рис. 4), измерялось с помощью приемных электродов, расположенных внутри отверстий – концентраторов напряжений. Это сопротивление, начиная с отметки времени 5000 секунд (5 кс), систематически снижалось до конца эксперимента, временами претерпевая отдельные изменения скорости уменьшения. Сопротивление ρ_5 , измеренное в том же локальном участке, но в направлении перпендикулярном ρ_2 , имело более сложный характер изменений во времени. Так, в начальной стадии эксперимента оно имело тот же характер, что и ρ_2 , а, начиная со времени около 12 кс., стало увеличиваться, одновременно испытывая знакопеременные вариации, до отметки времени 15 кс. После этого резко уменьшилось и, в дальнейшем, снижалось вплоть до конца эксперимента.

Наблюдения за поверхностью образца по-

Рис. 5. Изменения электрического сопротивления и деформации локальных участков нижней части образца



зволили выявить развитие откола в правом верхнем углу образца в период времени с 12 до 13,5 кс. В этом же интервале времени отмечены вариации активности акустической эмиссии N_1, N_2, N_3 и вариации сопротивления ρ_5 . Максимальных значений активность акустической эмиссии образца достигла примерно к отметке времени 11 кс после начала эксперимента.

Рассмотрим также результаты наблюдений за изменениями сопротивлений и локальных деформации нижнего (третьего) участка образца (рис. 5). Сопротивления ρ_3 и ρ_6 в начале эксперимента увеличивались, а затем, происходило их уменьшение до конца эксперимента с отдельными знакопеременными вариациями малой амплитуды. Наиболее значительные вариации сопротивления имели место в интервале времени 10–12 кс. Локальные деформации ε_7 и ε_9 росли с течением времени эксперимента. Однако, их величина была существенно меньше, чем величина локальных деформаций, измеренных в верхней и средней частях образца. Заметим, что нижняя часть образца претерпела гораздо меньшие нарушения и к концу эксперимента сохранилась лучше верхней и средней частей образца. Визуально наблюдаемых трещин на ее поверхности практически не отмечалось.

Основываясь на результатах измерений комплекса деформационных, электрических и сейсмоакустических параметров образца можно предложить следующую модель (описание) процесса подготовки его разрушения. В начальный период увеличения нагрузки на образец (1–4 кс.) происходят подвижки по имеющимся трещинам практически по всему объему образца. Это подтверждается как увеличением числа сейсмоакустических импульсов низкой частоты (N_4), так и ростом сопротивления и значительными знакопеременными вариациями локальных деформаций во всех областях образца.

В дальнейшем, начиная с 5000 – 6000 секунд увеличение нагрузки приложенной к образцу, приводит к образованию в нем новых трещин. Этот процесс сопровождается увеличением общего числа сейсмоакустических импульсов по всему спектру регистрируемых частот и всему объему образца (рост значений N_1 и N_2). При этом, возможно, происходит перераспределение влаги, содержащейся в образце, образование новых токо-

проводящих каналов, ориентированных в направлениях близких к направлениям диагоналей образца. Причем, исходя из большего значения амплитуды локальных деформаций $\varepsilon_3, \varepsilon_5, \varepsilon_7$ по сравнению с $\varepsilon_2, \varepsilon_6$, ориентированных взаимно перпендикулярно, а также того, что снижение сопротивлений ρ_1, ρ_2, ρ_3 достигает больших амплитуд по сравнению с сопротивлениями ρ_4, ρ_5, ρ_6 , можно предположить, что происходит раскрытие трещин, а следовательно и увеличение площади поперечного сечения насыщенных водой токопроводящих каналов, ориентированных параллельно диагонали, проходящей из левого верхнего угла образца в правый нижний угол. Отметим также и большую степень разрушения верхней части образца по сравнению с нижней частью, что нашло свое отражение и в амплитудах локальных деформаций.

Наибольший интерес представляет интерпретация изменений комплекса параметров в центральной части образца. Как видно из рис. 7 и 10, во время образования трещин происходит интенсивная локальная деформация ε_5 , отражающая увеличение поперечного сечения насыщенных влагой трещин, ориентированных в направлении параллельном линии, соединяющей сквозные отверстия – концентраторы напряжений. Этот процесс привел к разрыву датчика деформации ε_5 и систематическому снижению сопротивления ρ_2 . В перпендикулярном направлении процесс локальной деформации замедлился вблизи отметки времени 12 кс.

В это же время происходит развитие откола в верхней части правого ребра образца. Этот процесс отразился на графиках активности сейсмоакустической эмиссии в виде бухтообразной вариации в интервале времени 12–13,5 кс. Т.е. процесс образования трещин и разрушения (разрыхления) в образце происходил первоначально по всей массе образца, с большей интенсивностью в верхней части, а затем, произошла его локализация в верхней части правого ребра. Во время проработки – разрушения и откола – этого участка останавливаются или замедляются процессы образования трещин в других частях образца. Выразилось это в виде бухтообразных вариаций электрического сопротивления ρ_1, ρ_6, ρ_5 . После откола кусочка образца вновь возрастают напряжения в сохранившейся части образца, а также, нарастает ин-

тенсивность образования трещин. Этот процесс протекает наиболее отчетливо в центральной части образца и сопровождается увеличением активности сейсмоакустической эмиссии. При этом содержащаяся в образце влага возможно уже не успевает проникать во вновь образующиеся трещины, либо ее уже становится мало для их заполнения, вследствие чего сопротивление на отдельных участках образца возрастает - ρ_5 или замедляется его снижение - ρ_2 . Наконец, при достижении отметки времени примерно 15 кс, прочный участок между концентраторами напряжений разрушается и происходит заметный сброс нагрузки, выдерживаемой образцом. После этого, начинаются подвижки по достаточно крупным трещинам, вновь возрастает низкочастотная эмиссия (N_4), продолжает снижаться сопротивление всего образца. Этот процесс завершается окончательной потерей несущей способности образца, его разрушением и сбросом нагрузки.

Сформулируем кратко схему процесса разрушения данного образца. В начальный период роста нагрузки на образец (0-7 кс) происходит неупругая деформация образца, обусловленная подвижками по имеющимся трещинам. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к росту числа трещин неоднородно по объему, в верхней части более интенсивно. В интервале 11-12 кс начинается формирование внутреннего разрыва; образец приближается к стадии запредельного деформирования. На этом фоне развивается локальный процесс: формирование крупного откола, влияние которого оказалось заметным и в сравнительно удаленных областях. Разрушение центральной части образца завершается к 15-15,5 кс, после чего продолжается укрупнение трещин, приводящее к окончательному разрушению образца.

Так на конкретном примере показана взаимосвязь изменений активности акустической эмиссии, локальных деформаций и электропроводности образца. На основе ана-

лиза и обобщения полученных фактических данных предложена схема развития процесса деформирования и разрушения образца. Из приведенных выше данных ясно, что информация об изменениях физических свойств образцов позволяет определить характер протекания деформационных процессов в отдельных участках образца. Изучение процессов подготовки и развития разрушения неоднородной среды на образцах горных пород позволяет сделать вывод о том, что при этом возникают сложные знакопеременные вариации их физических свойств, отражающие различные стадии процесса деформирования и разрушения конкретного сложно построенного образца. Полученные результаты могут быть использованы для комплексной интерпретации геофизических аномалий в целях прогноза горных ударов и землетрясений.

Выводы

Проведено обобщение экспериментальных данных о поведении и характерных особенностях изменений деформационных и электрических параметров и активности акустической эмиссии образцов горных пород при постоянной скорости деформирования образцов в атмосферных условиях. Проведен анализ изменений комплекса параметров: активность акустической эмиссии, локальная и общая деформации, электрическое сопротивление и потенциалы, во время увеличения нагрузки на образцы горных пород, отражающих различные стадии процесса деформирования и подготовки разрушения. Выявлены характерные изменения электрических и деформационных параметров при подготовке разрушения: **рост локальных деформаций, снижение сопротивления, уменьшение частоты импульсов АЭ**; происходящие неоднородно как в пространстве, так и во времени, в зависимости от локальных особенностей протекания процессов деформирования и подготовки разрушения образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1967, 280с.
2. Вознесенский А.С., Демчишин Ю.В. Закономерности АЭ при деформировании горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999, №6. – С. 136-137.

3. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Физическое моделирование современных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003, № 3. – С. 71-77.
4. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Салов Б.Г. Деформации и трещинообразование в образцах горных по-

род при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений / Модельные и натурные исследования очагов землетрясений / – М.: Наука, 1991. – С. 156-162.

5. Жуков В.С. Исследование динамики физических свойств горных пород при их деформации и разрушении // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2002, № 7. – С. 58-62.

6. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Изменения деформационных параметров образцов пород перед их разрушением, на примере горных пород Туркменистана // Известия АН ТССР, серия ФТХГН, 1990, №2. – С.64-68.

7. Жуков В.С., Пономарев А.В. Вариации электрического поля образцов известняка при изменении напряженно-деформированного состояния // Известия АН ТССР, серия ФТХГН, 1990, №6. – С. 61-64.

8. Жуков В.С., Пономарев А.В., Стаховская З.И. Вариации электрического сопротивления образцов известняка при изменениях напряженно-деформированного состояния // Известия АН ТССР, серия ФТХГН, 1990, №3. – С. 61-64.

9. Brady B.T. Laboratory investigation of tilt and seismically anomalies in rock before failure // Nature, v.260, 1976, №5547. – P.851-861.

10. Buben J., Kozak J. Acoustic emission in loaded sandstone specimens as precursor of sudden failure // Publication Institute of Geophysics Poland Academy of Sciences, v.22, 1999. P.347-350.

11. Yoshida Shinga, Clint Oswald C., Summond Peter R. Electric potential changes prior to shear fracture in dry and saturated rocks // Geophysical Research Letters, v.25, 1998, №10. – P.1577-1580.

12. Zang A, Wagner F.C., Stanchita S., Janssen C., Dresen G.J. Fracture process zone in granite // Journal of geophysical research, series B, v.105, 2000, №10. – P.23651-23661.

13. Stopinski W., Mucha L., Konopacki I. Geoelectric instrument MSK-01 // Publication Institute of Geophysics of Poland Academy of Sciences, M5 (155), 1982. – P.191-198.

14. Стопинский В.Я., Жуков В.С., Бабичев О.В., Лось В.Ф., Пономарев А.В. Изменения электросопротивления, локальных деформаций и акустической эмиссии при деформации и разрушении карбонатных пород Туркменистана // Acta Geophysica Polonica 1992, №40. – С. 75-87.

Коротко об авторах

Жуков Виталий Семенович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ВНИИГАЗ.
Кузьмин Юрий Олегович – профессор Московского государственного горного университета, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИФЗ РАН.

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ЕРЕМЕНКО Олег Владимирович	Экономическое обоснование сравнительной оценки деятельности угледобывающих предприятий	08.00.05	к.э.н.
КОЛЕСНИКОВ Вячеслав Владимирович	Экономическое обоснование организации производства стекольной продукции на горно-обогатительных комбинатах кварцевых песков	08.00.05	к.э.н.