

С.Д.ВИКТОРОВ, А.Н.КОЧАНОВ, А.В.МАТВЕЕВ

Институт комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

М.Г.ЗИЛЬБЕРШМИДТ, И.В.ВЕЛЕСЕВИЧ

Московский государственный горный университет, Россия

К.К.ШВЕДОВ

Институт прикладной химической физики РАН,

Черноголовка, Россия

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНТЕНСИВНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Разработана методика и проведены экспериментальные исследования по оценке структурных изменений образцов горных пород в ближней зоне действия взрыва. С использованием оптической микроскопии и рентгеноструктурного анализа установлено, что при прохождении ударных волн происходит изменение микроструктуры пород: увеличивается дисперсность минеральных зерен, на порядок возрастает плотность микроповреждений.

A procedure was developed and experiments were conducted to assess structural changes in rock specimens in the vicinity of explosion. It was discovered using optic microscopy and x-ray structural analysis that rock microstructure was changing when exposed to blast waves: mineral grain size was decreasing and density of microdefects increased by one order of magnitude.

Несмотря на отсутствие единой точки зрения на механизм разрушения пород взрывом многие исследователи полагают, что первоначально после детонации заряда разрушение происходит на фронте ударной волны и обусловлено ее действием [4, 5]. В зоне действия ударных волн напряжение на фронте волны для прочных горных пород составляет до 10^{-1} ГПа и превышает модуль объемного сжатия среды, порода вблизи заряда раздавливается и переходит в текучее состояние, образуя зону пластических деформаций.

Для изучения микроструктурных изменений свойств горных пород в зоне пластических деформаций проведены экспериментальные исследования на образцах различных горных пород (табл.1). Образцы горных пород в виде пластинок толщиной 5 мм помещались в специальные металлические ампулы сохранения (рис.1). Исследования проводились по методике, описанной в ра-

боте [1]. Схема проведения экспериментальных исследований показана на рис.2. Каждая ампула запрессовывалась в свинцовую обойму, которая помещалась на специальную металлическую подставку. Заряд состоял из 4-тротиловых шашек (плотность тротила $1,59 \text{ г/см}^3$, скорость детонации 6940 м/с) диаметром 60 мм и высотой 30 мм и помещался на крышку ампулы. Иницирование заряда осуществлялось с помощью электродетонатора. В экспериментах при иницировании заряда формировалась плоская ударная волна, входящая в образец, с давлением на фронте около 10^{10} Па. После взрыва для извлечения образцов ампулы разрезались на станке.

После взрыва образцы горных пород оказались макроненарушенными без фрагментации на отдельные части, но в то же время даже визуально наблюдается изменение их первоначальной микроструктуры (рис.3).

Таблица 1

Свойства горных пород

Порода	Плотность, г/см ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Скорость продольных волн, м/с	Пористость, %
Песчаник (Подмосковный)	2,6	90	4800	8
Уртит	2,6	120	5200	—
Песчаник	2,6	60	2950	—
Доломит	2,71	230	6900	1,3
Известняк	2,41	60	5190	4,4
Гранит	2,6	150	5100	0,1

С помощью оптической микроскопии и рентгеноструктурного анализа проанализированы параметры структурного состояния минерального вещества образца песчаника в исходном состоянии и после взрывного нагружения с использованием методик, изложенных в работах [2, 3, 6]. Оптические исследования проводились на микроскопе

«NEOFOT» фирмы «Karl Zeiss» с применением компьютерной обработки изображений.

Исследования показали, что для данных условий динамического нагружения образцов горных пород не происходит «аморфизации» структуры порообразующих минералов. Наблюдается сохранение дальнего



Рис.1. Образец уртиты в ампуле сохранения

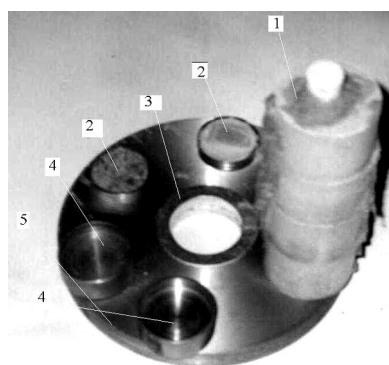


Рис.2. Проведение экспериментов по динамическому нагружению

1 – заряд ВВ; 2 – образцы горных пород;
3 – свинцовая обойма; 4 – крышка ампулы
сохранения; 5 – стальной диск



б



Рис.3. Вид фрагмента поверхности уртиты до (а) и после (б) взрывного нагружения

порядка в структуре кварца и ортоклаза, о чем свидетельствует наличие характерных дифракционных пиков минералов на рентгенограммах, полученных на образцах до и после воздействия. Но, несмотря на сохранение трехмерной упорядоченности структуры минералов, в агрегате произошли интенсивные процессы неупругой деформации. В частности, оптическая микроскопия фиксирует множественное образование локальных нарушений сплошности, которое характеризуется резким ростом плотности рефлексов отражения падающего на образец света, выразившейся в характерном изменении получаемых изображений (рис.4).

Распределение, появившихся нарушений сплошности неравномерно, что свидетельствует о протекании процессов неупругого деформирования как в объеме минеральных зерен, так и на границах их контактов с соседними зернами. Следует заметить, что поликристаллический агрегат породы способен реализовывать несколько механизмов неупругого поведения, локализующихся как внутри элементов строения породы, так и на их границе. В частности, в рассматриваемом поликристаллическом агрегате возможны процессы преобразования дислокационной структуры зерен кварца и ортоклаза, появление нарушений сплошности по спайности в ортоклазе и в объеме зерен кварца, а также на межзеренных границах. Неупругое поведение зерен кварца связано в основном с ростом плотности дислокаций в плоскостях скольжения и двойникованием.

В связи с хаотической ориентацией зерен кварца в пространстве наблюдается неоднородность поля напряжений, вызванного анизотропией упругости его зерен. Так, например, используя вероятностно-статистический подход к описанию поведения агрегата, можно считать отклонение напряжений от средней величины пропорциональным различию между значением упругости кристалла в определенном кристаллографическом направлении и усредненной величиной. Оценки показывают, что в полиминеральном агрегате данного состава отклонение напряжений от средней величины, в основном за счет присутствия сильноанизотропного ортоклаза, может достигать 30 %, и как следствие – неоднородность протекания процессов неупругого деформирования в объеме минерального агрегата.

Для исследования тонкой кристаллической структуры (размеров областей когерентного рассеяния и микродеформаций) применялись методы гармонического анализа и аппроксимаций профиля рентгеновских линий. Для получения информации о параметрах структурного состояния минералов в агрегате производился компьютерный анализ положения и формы профиля дифракционных линий. Об изменении параметров структурного состояния кварца (размер блока мозаики, плотность дислокаций и др.) в образцах, подвергнутых интенсивному динамическому нагружению, свидетельствует наблюдаемое изменение ширины профиля дифракционных линий (табл.2).

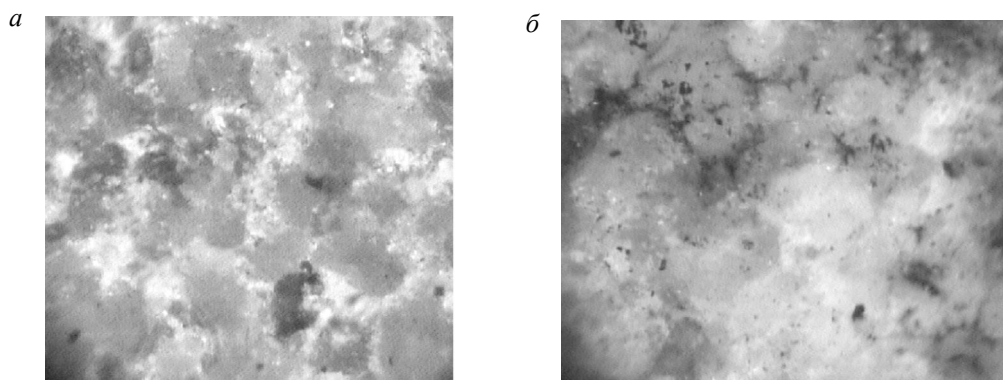


Рис.4. Изменение нарушенности минерального агрегата песчаника в результате интенсивного динамического нагружения (при увеличении в 320 раз) до (а) и после воздействия (б)

Параметры структурного состояния кварца

Измеряемый параметр	Для образца в исходном состоянии	Для образца после нагружения
Средний размер блока мозаики, А	870	438
Плотность дислокаций:		
в блоке мозаики, 10^{-11} см^{-2}	0,67	0,45
на границе блока мозаики, 10^{-11} см^{-2}	5,6	12,6
Остаточная деформация, 10^{-3} см^{-2}	4,2	9,7
Концентрация двойниковых дефектов упаковки, отн. ед.	8,6	14,3

Таким образом, изменение состояния природного минерального вещества при интенсивном динамическом нагружении происходит в результате разноуровневых и разномасштабных процессов неупругой деформации структурных элементов породы. Именно с ними связаны остаточные изменения, наблюдаемые на дифракционных спектрах и изображениях, полученных с помощью оптической микроскопии. В частности, появление видимых нарушений сплошности является следствием процессов, происходящих на уровне кристаллической решетки, а именно, ростом дислокаций, их торможения на препятствиях и слияния с образованием зародышей крупных нарушений сплошности. Произошедшие структурные преобразования вызывают изменения физических свойств минерального вещества.

Рост плотности дислокаций в кристаллическом веществе приводит к росту его химической активности. Об этом косвенно свидетельствует изменение скорости растворения минерального вещества при подготовке его к оптическим исследованиям. Другим подтверждением этого является проникновение материала ампулы сохранения в минеральное вещество (рис.5).

Необходимо заметить, что структурная поврежденность минералов, входящих в породу, неодинакова и зависит от различия и анизотропии их механических свойств. Так, например, в граните степень поврежденности минеральных зерен максимальна у полевого шпата, обладающего ярко выраженной анизотропией механических свойств.

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют об изменениях генетических структурных напряжений порообразующих минералов (за счет образования нарушений сплошности), а также возрастании плотности дислокаций в зернах кварца в результате интенсивного взрывного воздействия. Кроме того, после воздействия повышаются дисперсность минеральных зерен, слагающих породу, и плотность, резко снижается пористость. Эти закономерности характерны в той или иной степени для всех типов исследованных пород. Учитывая результаты исследований [1] для кварцевого стекла, по аналогии можно предположить, что при динамическом сжатии уплотнение образцов происходит после их дробления на микроблоки. Амплитуда ударной волны, входящей в образец, определяет степень дробления исходного материала. Степень необратимого уплотнения самих микроблоков зависит, очевидно, от



Рис.5. Следы проникновения металла ампулы сохранения в образец песчаника, подвергнутого интенсивному динамическому нагружению

максимального давления в образце. Уплотнение начинается после преодоления динамического предела прочности. Следует отметить, что наблюдаемый рост химической активности минерального вещества, подвергнутого интенсивному динамическому нагружению, можно использовать для формирования новых технологических свойств минерального вещества. Наиболее интересными, на наш взгляд, являются приложения этих исследований в сферу механохимических исследований, в том числе и механохимического синтеза.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-05-00704).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие ударных волн на двуокись кремния / А.В.Ананьин, О.Н.Бреусов, А.Н.Дремин и др. // ФГВ. 1974. № 3.
2. Дмитриев А.П. Физические принципы управления технологическими параметрами горных пород / А.П.Дмитриев, М.Г.Зильбершмидт; МГГУ. М., 1989.
3. Зильбершмидт М.Г. Методы исследования структурного состояния горных пород / М.Г.Зильбершмидт, Т.К.Заворыкина; МГГУ. М., 1989.
4. Метод улучшения дробления пород взрывом / Н.В.Мельников, Л.Н.Марченко, И.Ф.Жариков, Н.П.Сеинов // ФТПРПИ. 1979. № 6.
5. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976.
6. Новик Г.Я. Управление свойствами пород в процессах горного производства / Г.Я.Новик, М.Г.Зильбершмидт. М.: Недра, 1994.