

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Кочанов А.Н.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия, E-mail: kochanov@mail.ru*

Разрушение материалов является важной научной проблемой, решению которой посвящены многочисленные исследования, имеющие как прикладную, так и фундаментальную направленность и связанную с установлением закономерностей развития трещин на разных масштабных уровнях[1]. Закономерности протекания процесса разрушения во многом определяются структурой, которая характеризуется формой и размером зерен, пористостью, наличием микродефектов, и наряду с химическим составом определяет физические свойства материалов, в том числе и прочностные. Применительно к горным породам надежная аттестация их структурных и прочностных характеристик является необходимым инструментом для максимально безопасного и эффективного освоения недр, например при строительстве подземных сооружений [2] или ведении горных работ, в том числе с целью предупреждения катастрофического разрушения в виде горных ударов и других опасных динамических явлений.

Горные породы в абсолютном большинстве представляют собой поликристаллические или гетерогенные природные минеральные системы, состоящим из совокупности отдельных элементов – зерен различных минералов, имеющих, как правило, различные упругие и прочностные характеристики. Зернистость горных пород является важным свойством структурного строения, во многом определяющим прочность горных пород, которая с увеличением размеров зерна обычно снижается. Важным элементом структуры материала являются микротрещины, которые представляют собой нарушение сплошности твердого тела, дефекты от атомного до субзеренного масштаба, между берегами которых разорваны молекулярные связи. Исходя из экспериментальных результатов, минимальный размер микротрещин в твердом теле составляет ~ 0,1 мкм [3]. Применительно к горным породам нет единого мнения о геометрических параметрах микротрещин. В целом принято считать, что длина микротрещин в горных породах достигает 1,0-100,0 мкм, но в отдельных случаях принимается, что они могут иметь ту же протяженность, что и размеры слагающих породу зерен минералов (до 1-10 мм). При этом определяющая роль в процессах разрушения и деформирования горных пород принадлежит микротрещинам длиной ~100 мкм. Микротрещины изначально присутствуют в горной породе с момента ее образования, и, в зависимости от типа горной породы или даже размера зерен существует свой характерный размер микротрещины. Содержание кварца в горных породах оказывает значительное влияние на образование микротрещин.

Для оценки размеров природных микротрещин в граните проведены исследования, которые показали, что характерный размер микротрещин составляет ~100 мкм при величине раскрытия ~ 0,5 мкм по данным электронной микроскопии и ~ 50-100 мкм величина раскрытия по данным оптической микроскопии. Электронно-микроскопическое изображение природных микротрещин в граните представлено на рисунке 1,а, которое в какой-то степени отражает субструктуру данной горной породы, так как согласно классификации она выявляется при увеличении в 1000 и более раз.

С целью изучения микротрещин и их эволюции при динамическом разрушении выполнены экспериментальные исследования на образцах различных горных пород, результаты которых представлены в работе [4]. В ходе проведения экспериментальных исследований осуществлялось динамическое воздействие на образцы горных пород, помещенные в специальные ампулы сохранения. С помощью электронной микроскопии анализировались поверхности фрагментов образцов горных пород до и после динамического воздействия. Всего было получено примерно тысяча отдельных изображений при различных масштабных уровнях рассмотрения с использованием электронного микроскопа JEOL-JSM 5910LV. Наиболее характерные изображения микротрещин, образовавшихся после динамического разрушения в граните представлены на рисунке 1,б.

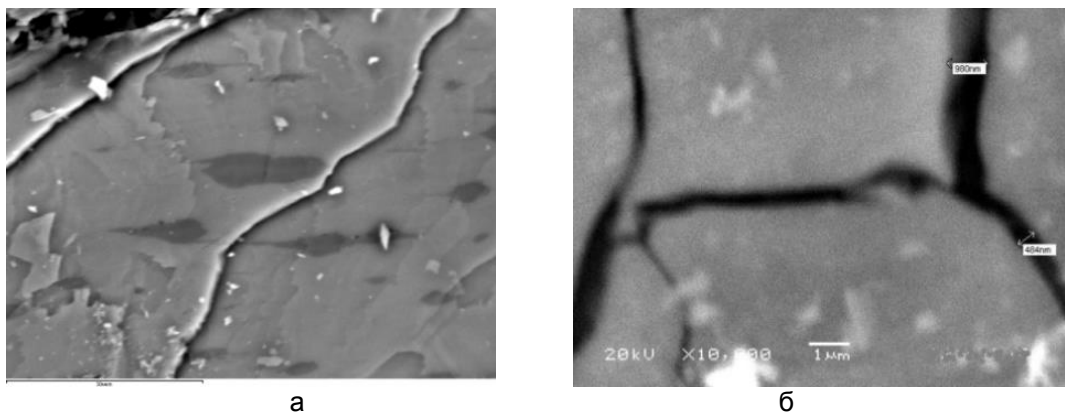


Рисунок 1 – Природные микротрещины в граните (а) и после динамического воздействия (б) по данным электронной микроскопии

На основании экспериментов установлено, в условиях действия высокого импульсного давления  $\sim 1-10$  ГПа возможно образование микротрещин, минимальная величина раскрытия которых составляет  $\sim 0,1$  мкм. Величина раскрытия микротрещин является важной характеристикой, определяющей условия их развития. Коэффициент облика микротрещины, как отношение величины ее раскрытия к длине, в большинстве случаев, составлял  $\sim 10^{-2}$ .

Следует отметить, что каждому типу породы определенного минерального состава соответствует диапазон изменения свойств, определяемый его структурными особенностями: наличием микродефектов и состоянием межзеренных границ. В естественном состоянии любой образец, а также отдельные его области, могут находиться в любом интервале диапазона. В зависимости от этого при действии физических полей его поведение будет изменяться в определенных пределах, допускаемых общими возможностями границами свойств горных пород. Исследования, выполненные с помощью ультразвукового контроля, показали, что значения скорости продольных волн в отдельных локальных точках образца горных пород могут существенно различаться, и это распределение с течением времени с момента первоначальных измерений может видоизменяться [5]. При динамическом воздействии его результат существенным образом зависит от степени неоднородности горных пород. В качестве примера на рисунке 2 представлено распределения относительных изменений скорости продольных волн (%) в образце мрамора после динамического воздействия. Осуществлялось прозвучивание образца по сетке с шагом 3 см с использованием прибора УК-14П.

Неоднородность состава горных пород как совокупности зерен минералов, имеющих в силу различного химического состава отличные физические свойства, в том числе упругие и прочностные, обуславливает разброс их значений, который принято количественно оценивать коэффициентом вариации. Для оценки упругих и прочностных свойств отдельных минералов и горных пород проведены экспериментальные исследования с применением методов нано- и микроиндентирования, позволяющие определять твердость и модуль Юнга, вязкость разрушения образцов на различных масштабных уровнях. Результаты исследований отражены в работе [3] и частично представлены в таблице 1.

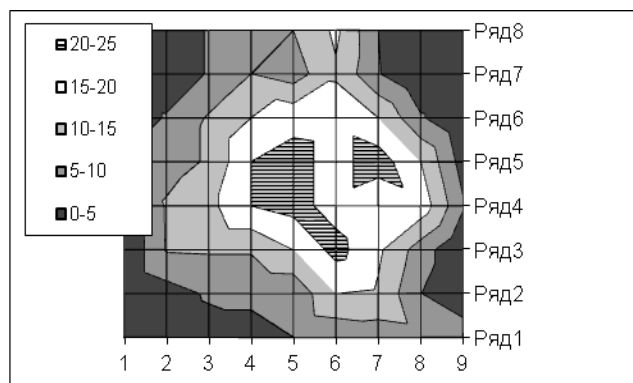


Рисунок 2 – Изменение скорости продольных волн в образце мрамора после динамического воздействия

Таблица 1 – Результаты исследований упругих и прочностных свойств горных пород

Показатели	Кварцит	Песчаник	Доломит	Гранит
Модуль Юнга, ГПа	170	90	40	85
Коэффициент вариации, %	9,1	9,0	20,1	5,0
Твердость, ГПа	6,5	9,3	0,9	9,5
Коэффициент вариации, %	17,8	14,4	57,0	7,1

Таким образом, с помощью современных методов физического эксперимента оптической и электронной микроскопии, ультразвукового контроля, нано- и микроиндентирования выполнено изучение элементов структуры горных пород, рассмотрена ее эволюция в условиях динамического воздействия как результат развития микродефектов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00066).*

**Список литературы:**

1. Ботвина, Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности /Л.Р. Ботвина. – М.: Наука, 2008. –334 с.
2. Шемякин, Е.И. Геомеханика глубоких подземных сооружений /Е.И. Шемякин //Бюллетень Белорусской горной академии. 1998 –№1. С.4-9.
3. Бетехтин, В.И. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах/ В.И. Бетехтин, А.Г.Кадомцев //Физика твердого тела.2005. т.47, вып.5 . С.801-807.
4. Викторов, С.Д. Развитие микротрещин при динамическом разрушении горных пород / С.Д. Викторов, А.Н.Кочанов// Изв. РАН.Серия физическая. – 2015. – т.79, №6. – С. 829-831.
5. Викторов, С.Д. Динамика упорядочивания микроструктуры и свойств образцов горных пород в результате взрывного воздействия/ С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов// Изв. РАН. Серия физическая. – 2014. – т.78, №4. – С. 385-391.
6. Головин, Ю.И., Размерные эффекты упругих и прочностных свойств отдельных фаз и межфазовых границ поликристаллических материалов /Ю.И. Головин, С.Д. Викторов, А.И. Тюрин, А.Н. Кочанов., А.В. Шуклинов, Т.С. Пирожкова, И.А. Шуварин // Изв. РАН. Серия физическая. 2016. –Т. 80, № 5. –С. 573–577.