

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКИ  
ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИКИ ТРЕЩИН**

**Викторов С.Д, Кочанов А.Н.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г.Москва, Россия  
e-mail: [kochanov@mail.ru](mailto:kochanov@mail.ru)*

Изучение природы разрушения твердых тел, в том числе горных пород, является одной из приоритетных проблем механики и физики прочности. При кажущейся простоте разрушения его механизм весьма сложен и охватывает огромную область на шкале размеров, начиная от атомного масштаба, а завершается визуальными проявлениями. В рамках современных представлений разрушение материалов является неравновесным пространственно-временным процессом накопления повреждаемости, обусловленного образованием и развитием разномасштабных по размерам (от десятков нанометров и более) пор и трещин. природа которого заключается в микроскопической неоднородности материалов и их структурных особенностях [1-5].

Описание роли теплового движения в процессе разрушения составляет основу кинетическая концепция прочности С.Н. Журкова, которая базируется на экспериментальных результатах, полученные для широкого круга материалов искусственного и естественного происхождения, включая полимеры, металлы, горные породы. Важным следствием кинетического подхода к процессу разрушения твердых тел стало количественная формулировка критерия, известного как концентрационный критерий разрушения. Применительно к горным породам разрушение протекает в две стадии, одна из которых связана с объемным накоплением микродефектов. Представление разрушения, как пространственно-временного процесса накопления и развития нарушений сплошности материала, позволяет обосновать принципиальную возможность прогноза разрушения, например, по интенсивности акустической и электромагнитной эмиссии.

Развитие современной механики разрушения связано с пониманием фундаментальной роль трещин в снижении прочности твердых тел (А.Гриффитс) и введением константы, получившей название «вязкость разрушения» (трещиностойкость). При этом минимальная длина трещины, развивающейся в сплошном теле, определяется уровнем напряжений: чем меньше их значения, тем больше минимальная длина трещин. Кроме того, в работах Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова, признанных в настоящее время классическими, введено понятие поврежденности, что в неявном виде это подразумевает накопление множественных микродефектов.

Вопрос о размерах микродефектов, ответственных за процесс разрушения, достаточно сложен и не решен до настоящего времени и требует проведения дальнейших экспериментальных исследований. В работе [6] с применением метода компьютерной рентгеновской микротомографии получены интересные результаты по оценке размеров микродефектов в образцах горных пород.

С применением этого метода с целью изучения развития микродефектов в горных породах в настоящей работе выполнены экспериментальные исследования. Особенность методики экспериментов заключалось в том, что в качестве образца использовался гранит, представляющий собой природный поликристаллический материал, который до изготовления образцов подвергался динамическому

воздействию. Исследование структуры образцов гранита проводилось на томографе SkyScan 1272.

В результате сканирования было установлено наличие микропор диаметром от 1,0 до 5,0 мкм, которые имели неравномерное распределение в объеме гранита, как это следовало из полученных 3D изображений (рис. 1). Общая пористость исследованного образца равна ~1,8 %. В объеме гранита зафиксированы также микротрещины шириной от 3 до 10 мкм, длиной ~ 1000 мкм. Пустотное пространство некоторых трещин залечено более плотным минералом. Некоторые микротрещины связаны между собой и образуют разветвленную сеть. Результаты исследований с применением метода компьютерной рентгеновской микротомографии опубликованы в работе [7].

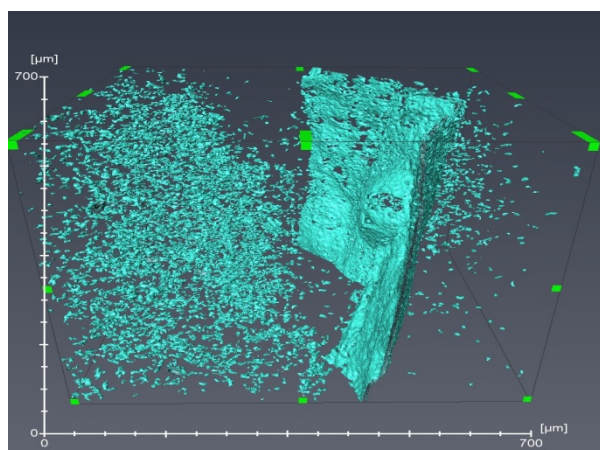


Рисунок 1- Область повышенной концентрации микродефектов в объеме гранита по данным рентгеновской микротомографии

С целью изучения микротрещин и их эволюции при динамическом разрушении выполнены ранее экспериментальные исследования на образцах различных горных пород, результаты которых представлены в работе [8]. С помощью электронной микроскопии анализировались поверхности фрагментов образцов горных пород до и после динамического воздействия. На основании экспериментов в условиях действия высокого импульсного давления ~1-5 ГПа установлено образование микротрещин, минимальная величина раскрытия которых составляет ~ 0,1 мкм.

Развитие микротрещин в результате взрывного воздействия оценивалось также с применением ультразвукового метода по скорости продольных волн. В качестве примера на рисунке 2а представлен график относительного изменения скорости  $\bar{C}_p = (C_{p0} - C_p(R))/C_{p0}$  в зависимости от расстояния R от заряда в образцах песчаника и мрамора. Кроме изменения скорости продольных волн, обусловленное развитие микродефектов, прямыми экспериментальными испытаниями установлено снижение прочности на растяжение образцов песчаника, что отражает рисунок 2б.

Следует также отметить результаты исследований контроля эмиссии частиц с помощью лазерных счетчиков как принципиально нового подхода и метода к изучению характера разрушения материалов в зависимости от их структурных особенностей [9].

Проблема прочности материалов носит не только фундаментальный характер, но и ее решение, в частности, необходимо для безопасного и эффективного освоения недр, например при строительстве подземных сооружений или ведении горных работ, в том числе с целью предупреждения катастрофического разрушения в виде горных ударов и других опасных динамических явлений.

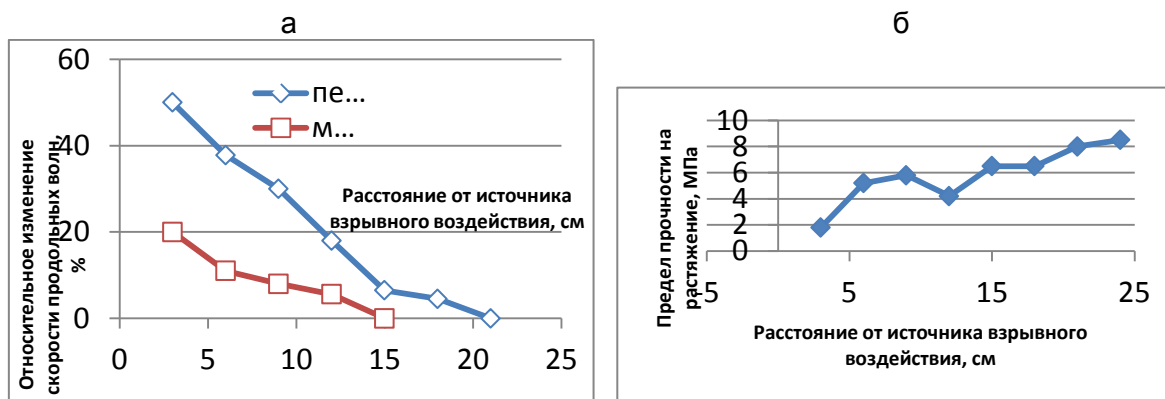


Рисунок 2 – Относительное изменение скорости продольной волны (а) и прочности (б) с расстоянием от источника взрывного воздействия

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

Список литературы

1. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел/ С.Н. Журков// Известия АН СССР. 1967.т.3.№10. С.1767-1777.
2. Ботвина, Л.Р. О некоторых общих закономерностей в механике и физике разрушения/Л.Р. Ботвина//VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва 7-10 ноября 2017. Сборник материалов М.: ИМЕТ РАН. 2017. С.240.
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. Новожилов, В.В., Слепян Л.И. Некоторые проблемы и достижения механики разрушения/ В.В. Новожилов, Л.И. Слепян// Вестник РАН АН СССР. 1987. №9. С.98-108.
5. Моисеенко, Д.Д. Физическая мезомеханика разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем/ Д.Д. Моисеенко, В.Е. панин// Механика твердого тела. 2015.№4. С.42-55.
6. Дамаскинская, Е.Е. Эволюция микротрещин в объеме деформируемого гетерогенного материала по данным рентгеновской микротомографии / Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов, В.Л. Гиляров, Д.В. Корост// Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LYIII международной конференции, 16-19 мая, 2017 г. Пермь.2017. – С.77
7. Викторов, С.Д. Анализ дефектов структуры в граните методом компьютерной рентгеновской микротомографии / С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов А.Н., А.А. Пачежерцев //Тез. Докладов Седьмой Международной конференции «Кристаллофизики и деформационное поведение перспективных материалов» 2-5 октября 2017. М.: МиСиС.2017. –С.56
8. 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.
9. Александров, П.А. Результаты экспериментальных исследований образования субмикронных частиц при разрушении твердых тел // П.А. Александров, С.Д. Викторов, В.И. Калечиц, А.Н. Кочанов // Известия РАН. Серия физическая. 2016. том 80. № 11. – С. 1496–1499.