

А.Н. Кочанов**МИКРОТРЕЩИНЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ
НА ПРИМЕРЕ ГОРНЫХ ПОРОД***

Выполнен анализ и рассмотрены некоторые физические аспекты образования микротрещин в твердом теле на примере горных пород. Приведены результаты экспериментальных исследований зарождения микротрещин в горных породах в условиях динамического разрушения. С помощью электронной микроскопии получены изображения микротрещин при различной степени увеличения. Развитие микротрещин наблюдается как в отдельных минеральных зернах, так и по их границам. Установлено, что минимальная величина раскрытия микротрещин в горных породах составляет $\sim 0,1$ мкм.

Ключевые слова: горная порода, микротрещина, электронная микроскопия, эксперимент, динамическое разрушение, изображение, механизм.

Существующие или возникающие на ранних этапах деформирования дефекты в виде микротрещин играют решающую роль в процессе разрушения твердых тел. Микротрещина является элементом структуры твердого тела и трактуется как нарушение его сплошности, плоский дефект от атомного до субзеренного масштаба, молекулярные связи между берегами которого разорваны [1]. Согласно общей классификации, которая включает и микротрещины, можно выделить по размеру три типа деформационных несплошностей: субмикронесплошности размером порядка 1 нм и 100 нм, микронесплошности микронного размера, а также макронесплошности с размером 10–100 мкм и более [2]. Возможность существования микронесплошностей размером порядка 1 нм, которые, как предполагается, образуются в момент слияния двух заторможенных дислокаций, доказана лишь теоретически. Экспериментально в силу ряда причин (в частности, неустойчивости) выявить несплошности подобных размеров невозможно. Субмикронесплошности размером порядка

100 нм образуются при деформации за очень короткое время, и характеризуют типичный размер зародышевых несплошностей в твердых телах. Более крупные деформационные несплошности размером более 100 мкм являются либо магистральными трещинами, либо их предобразованиями. Изучению условий формирования и параметрам микротрещин в твердом теле уделялось достаточно много внимания, а наиболее полные о микротрещинах в горных породах можно подчеркнуть из обзора работ [3, 4]. Из анализа данных этих исследований следует, что обычно длина микротрещин составляет 1–100 мкм (в некоторых работах до 1 мм), а коэффициент облика микротрещины как отношение ширины к длине достигает 10^{-2} . Принято считать, что определяющая роль в процессах разрушения и деформирования горных пород принадлежит микротрещинам длиной порядка 100 мкм.

Доминирующим фактором при образовании микротрещин в металлах, являются дислокации, но их роль в зарождении микротрещин в горных породах не выявлена и нуждается в даль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00446).

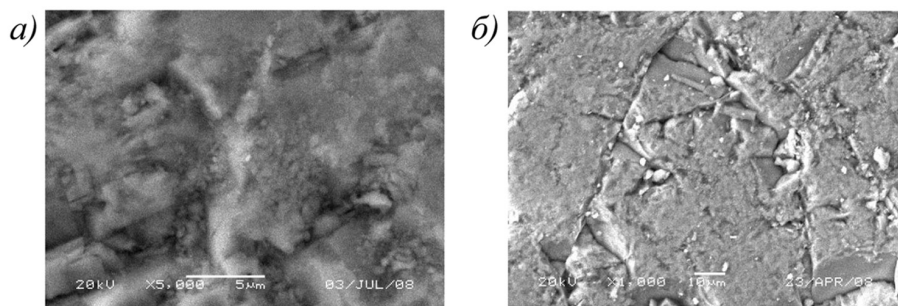


Рис. 1. Изображение поверхности гранита (а) и песчаника (б) до динамического разрушения

нейшем обсуждении. 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 изучения развития микротрещин в горных породах выполнены экспериментальные исследования, в ходе проведения которых осуществлялось взрывное воздействие на образцы, помещенные в специальные ампулы сохранения. Накладной заряд размещался на крышке ампулы. Схема взрывного воздействия на образцы горных пород была аналогична исследованиям [5]. В результате действия импульсных нагрузок микросекундной длительностью достигалось разрушение (дезинтеграция) горных пород с

образованием системы микротрещин, изучение которых осуществлялось после извлечения образцов из ампул сохранения.

С помощью электронной микроскопии анализировались поверхности фрагментов образцов горных пород до и после динамического (взрывного) воздействия. Следует отметить, что система микротрещин с выраженной иерархией размеров в поверхностном слое образцов до динамического воздействия, как правило, не наблюдалась. В отдельных случаях можно выделить микротрещины, представляющие скорее сцементированные границы между отдельными зернами (рис. 1).

В результате экспериментов получены изображения микротрещин, образовавшихся после динамического разрушения образцов горных пород, наиболее характерные из которых представлены на рис. 2, 3. Анализ по-

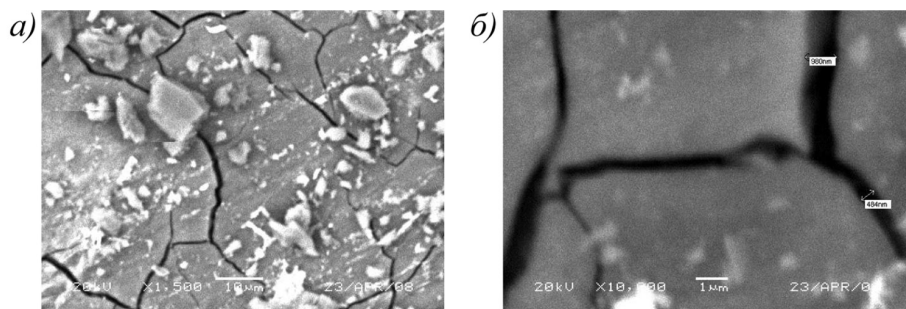


Рис. 2. Вид микротрещин в граните при увеличении 1500 $\times$ (а) и 10 000 $\times$ (б) после динамического разрушения

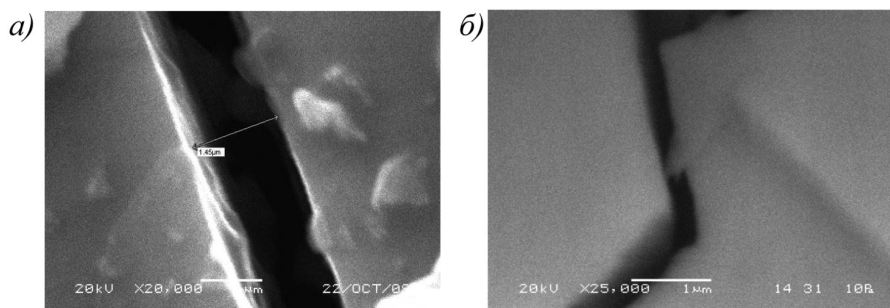


Рис. 3. Вид микротрещин в песчанике (а) и кварците (б) после динамического разрушения

лученных изображений позволяет оценить минимальную и максимальную величину раскрытия микротрещин порядка 0,1 и 10,0 мкм. Оценка величины раскрытия порядка 10,0 мкм была получена для мрамора, это скорее исключение, так как для большинства горных пород максимальная величина раскрытия составляла несколько единиц микрон. При этом длина микротрещин, точное определение которой значительно сложнее, достигает от 10,0 до 100 и более мкм при коэффициенте облика равным $1-5 \times 10^{-2}$. Образуются ли и могут существовать микротрещины раскрытием менее 0,1 мкм? Ответ на этот вопрос очень важен для понимания процесса разрушения твердых тел. При проведении исследований с помощью электронного микроскопа JEOL-JSM 5910LV при максимально возможном увеличении $50\,000\times$ данные дефекты после взрывного воздействия обнаружены не были.

Численная оценка величины раскрытия имеет значение для понимания механизма формирования микродефектов. Микротрещина с величиной раскрытия 100 мкм и более, очевидно, что не может существовать, и речь идет не только о терминах и диапазоне микро. Это связано с природой образования микротрещин, которая принципиально отличается от физической природы развития и образования ма-

кротрещин. Зарождение и развитие микротрещины представляет собой дискретное событие взрывного характера [6], реализующееся за очень короткий промежуток времени, в то время как развитие макротрещины связано с более длительными процессами, происходящими в ее вершине.

В зависимости от структурного и напряженно-деформированного состояния твердого тела различают три наиболее общих вида разрушения: вязкое разрушение, транскристаллический и межзеренный скол. Очевидно, что в той или этой степени эти механизмы развития микротрещин под действием механических напряжений характерны и для горных пород. В ходе экспериментов и анализа изображений отмечено, что большинство микротрещин, возникающих в горной породе в результате взрывного воздействия, имеют характер трещин растяжения, сдвиговый характер формирования дефектов не просматривается. Это соответствует общепринятым представлениям, согласно которым микротрещины в горной породе возникают, если величина локального напряжения больше локального значения прочности на растяжение. Преобладают внутрикристаллические трещины полностью находящиеся в пределах зерна, но также встречаются: микротрещины по границам раздела зерен, связанные или полностью совпадающие с гра-

ницей их раздела. Микротрещины по данным наблюдений часто возникают в виде параллельных групп различной длины, расположенных в пределах одного зерна. Условие образования стабильной микротрещины на границе зерен или на плоскости ослабления внутри зерна зависит от площади межзеренного контакта и наличия плоскости ослабления. Возможен и механизм образования микротрещин, когда формируется очаговая единичная область малого размера, от которой распространяются микротрещины. В данном случае формирование этой области может быть обусловлено очень сложной картиной распределения напряжений на микроскопическом уровне, которые по величине и знаку могут в значительной степени отличаться от макроскопического поля напряжений. Их первопричиной являются неоднородность и анизотропия структуры твердых тел. Микродеформации и соответствующие им микронапряжения,

которые, будучи локализованными, могут достигать уровня теоретической прочности [7].

Таким образом, с помощью электронной микроскопии получены изображения микротрещин, образовавшихся после динамического воздействия, исследована их структура и определены геометрические параметры. Важной характеристикой микротрещин является величина их раскрытия, диапазон изменения которой по данным экспериментов составляет 0,1–10,0 мкм. Результаты экспериментов позволяют отметить два механизма образования микротрещин: один связан с наличием плоскости ослабления или внутри отдельной минеральной фазы или на границе зерен различных минералов, другой обусловлен формированием, очевидно, за счет структурных особенностей и неоднородности локального объема горной породы поля напряжений на микроуровне с высокими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика твердого тела. Энциклопедический словарь, т. 2. – Киев: Наукова думка, 1998. – С. 384.
2. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
3. Kranz R.L. Microcracks in Rocks: a Review // *Tectonophysics*. – 1983. – № 100. – pp. 449–480.
4. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock // *Journal of geophysical research*. – 1983. – № 88. – pp. 9485–9492.
5. Викторov С.Д., Кочанов А.Н. Дезинтеграция образцов горных пород в условиях высокого импульсного давления // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2013. – Т. 77. – № 3. – С. 332.
6. Лексовский А.М., Баскин Б.Л. Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- и мезомасштаба и квазихрупкое разрушение материалов // *Физика твердого тела*. – 2011. – т. 53. – вып. 6. – С. 1157–1168.
7. Новожилов В.В., Слеплян Л.И. Некоторые проблемы и достижения механики разрушения // *Вестник АН СССР*. – 1987. – № 9. – С. 98–108. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кочанов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kochanov@mail.ru, Институт проблем комплексного освоения РАН.

UDC 622.02

CRACKS IN A SOLID FOR EXAMPLE ROCKS

Kochanov A.N., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: kochanov@mail.ru, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

The analysis and discusses some of the physical aspects of the formation of microcracks in the solid on the example of rocks. The results of experimental studies of nucleation of microcracks in rocks under conditions of dynamic fracture. Using electron microscopy obtained image of microcracks at different degrees of magnification. The development of microcracks observed in individual mineral grains and their boundaries. Established that the minimum amount of disclosure of microcracks in rocks is $\sim 0.1 \mu\text{m}$.

Key words: rock, crack, electron microscopy, experiment, dynamic failure, image, mechanism.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is executed at financial support of RFBR (grant 1 14-05-00446).

REFERENCES

1. *Fizika tverdogo tela. Entsiklopedicheskii slovar'*, t. 2 (Solid-state physics. Encyclopedic dictionary), vol. 2, Kiev, Naukova dumka, 1998, pp. 384.
2. Cheremskoi P.G., Slezov V.V., Betekhtin V.I. *Pory v tverdom tele* (Pores in a solid), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 376 p.
3. Kranz R.L. Microcracks in Rocks: a Review. *Tectonophysics*. 1983, no 100, pp. 449–480.
4. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock. *Journal of geophysical research*. 1983, no 88, pp. 9485–9492.
5. Viktorov S.D., Kochanov A.N. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2013, vol. 77, no 3, pp. 332.
6. Leksovskii A.M., Baskin B.L. *Fizika tverdogo tela*. 2011, vol. 53, issue 6, pp. 1157–1168.
7. Novozhilov V.V., Slepylan L.I. *Vestnik AN SSSR*. 1987, no 9, pp. 98–108.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ КАЧЕСТВА

Радкевич Яков Михайлович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, МГИ ИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru

Бойко Порфирий Федорович – кандидат технических наук, главный механик, ОАО «Стойленский ГОК», e-mail: Boiko_PF@Sgok.ru.

Изложены технологические решения и специальные многофункциональные мобильные станочные модули, обеспечивающие восстановление геометрической точности крупногабаритных деталей на местах установки уникального дробильно-размольного оборудования большой единичной мощности и методы оценки и прогнозирования качества машин.

Ключевые слова: дробильное оборудование, уникальные дробилки, крупногабаритные валы, восстановление точности, технологические модули, мобильные станочные модули, места установки оборудования.

TECHNOLOGICAL METHODS OF RESTORATION OF MINING MACHINERY ON SITE AND METHODS OF EVALUATION OF PREDICTION QUALITY

Radkevich Ya.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

Boyko P.P., Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer at JSC «Stoilensky GOK», Russia.

Technological solutions and special multifunctional mobile machine units, which restores the geometric accuracy of large parts on the places of a unique crushing and grinding equipment of large capacity and the methods of evaluation and prediction of quality machines.

Key words: machine, base value, performance, operation, comprehensive index, electric motor, crushing equipment, crushing cone, caliper.