

А.Н. Кочанов

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В ГРАНИТЕ В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Разрушение горных пород характеризуется образованием и развитием трещин на разных масштабных уровнях. С целью оценки параметров трещин, образовавшихся после взрывного воздействия, выполнены экспериментальные исследования с использованием оптической, электронной и сканирующей конфокальной лазерной микроскопии. Получены изображения трещин и их рельефа при различной степени увеличения. Неровности берегов трещины и ее профиля свидетельствуют об изменении скорости ее распространения, которое связано с формированием зоны локализации разрушения и последующим скачкообразным продвижением. Проявление стадийности процесса разрушения в локальных объемах у вершины трещины приводит к скачкообразности процесса ее развития. Установлено, что ширина трещины достигает своего максимума на некотором расстоянии от центра взрыва, что важно для уточнения механизма взрывного разрушения. При формировании трещин при взрывном воздействии существенную роль играют два механизма разрушения. Под действием волн напряжений происходит образование первичных трещин, а затем под действием газа их развитие. Первичные трещины представляют своеобразные каналы для проникновения газа, давление которого обеспечивает их дальнейший рост.

Ключевые слова: горная порода, взрывное воздействие, трещина, эксперимент, изображение, оптическая и электронная микроскопия, параметры, механизм.

Одним из определяющих технологических процессов в горном деле является процесс разрушения, изучению которого посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, имеющие как прикладную, так и фундаментальную направленность и связанные с установлением закономерностей и условий развития трещин в различных материалах [1–3]. Применительно к разрушению горных пород взрывом принято считать, что образование и развитие системы радиальных трещин, связано с распространением волн напряжений и квазистатическим расширением газовой полости, но

нет единого мнения в силу сложности протекающих при взрыве явлений о степени их влияния на процесс разрушения. Поэтому уточнение представлений о механизме взрывного разрушения, является актуальной научной задачей, и стало целью наших исследований, в рамках которых на основе изучения параметров и структуры рельефа трещин, образовавшихся в результате взрывного воздействия, делаются предположения о причинах их возникновения и условиях роста.

При проведении экспериментальных исследований система трещин создавались в образце гранита размером $25 \times 25 \times 15$ см с помощью взрывного воздействия. Заряд размещался в центре образца в шпуре диаметром 6 мм. Гранит представлял собой совокупность минеральных зерен кварца, полевого шпата, плагиоклаза, имеющие различные прочностные показатели. После взрыва образец гранита оставался внешне структурно неизменным. Для изучения трещин образовавшихся в граните, образец нарезался на отдельные пластины толщиной 3 см. Визуальный осмотр поверхности пластин позволил выявить систему радиальных трещин максимальной длиной $\sim 6-7$ см. С целью уточнения параметров и структуры трещин выполнены исследования с использованием оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии и сканирующей конфокальной лазерной микроскопии.

С использованием оптической микроскопии были получены изображения отдельных фрагментов трещины с учетом расстояния от взрывного воздействия, которые представлены на рис. 1. Анализируя эти изображения можно отметить, что ширина раскрытия трещины непосредственно у зарядной полости в месте ее зарождения примерно 3–4 раза меньше, чем ее максималь-

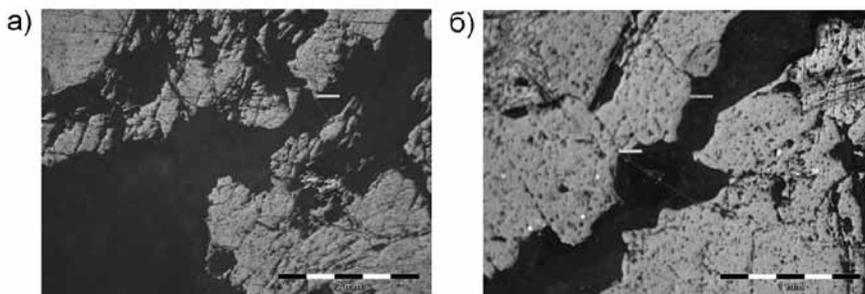


Рис. 1. Вид отдельных фрагментов трещины непосредственно вблизи зарядной полости (а) и на некотором удалении от нее (б)

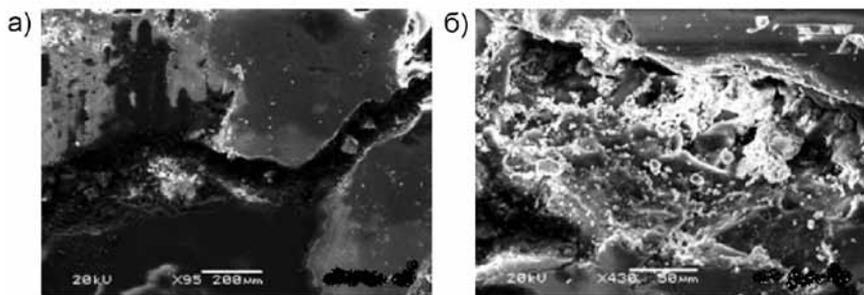


Рис. 2. Вид фрагмента трещины после взрыва непосредственно вблизи зарядной полости при увеличении 95^х (а) и 430^х (б)

ная ширина на более удаленном расстоянии от центра взрывного воздействия. По данным оптических изображений при увеличении ~30–40^х просматривается волнообразная структура рельефа трещины на отдельных ее участках. Изображения фрагментов трещины, полученные с помощью оптической микроскопии, согласуются с данными электронной микроскопии, которая их дополняет в плане информации о структуре рельефа внутри самой трещины (рис. 2).

Неровности берегов трещины и ее профиля, наблюдаемые на рис. 1, могут свидетельствовать об изменениях ее скорости распространения, связанных с формированием зоны локализации разрушения и последующим скачкообразным продвижением, так как развитие трещины связано с накоплением в области ее вершины различного рода повреждений. Проявление стадийности процесса разрушения на микроуровне, в локальных объемах у вершины трещины обуславливает скачкообразный характер процесса ее развития. Следует обратить внимание на тот факт,

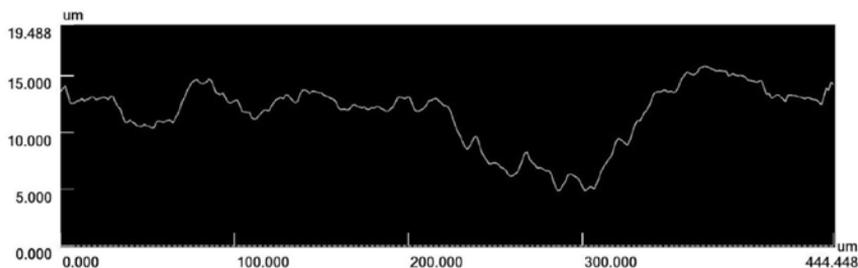


Рис. 3. Распределение значений глубины трещины по данным лазерной микроскопии

что поведение материалов около вершины трещины и особенности формирования зоны пластической деформации определяют возможности ветвления трещины [4–5]. Параметром, контролирующим переход от прямоугольного распространения к режиму ветвления, являются критические значения скорости распространения трещины $v_{кр}$, причем $v_{кр} < v_R$ (v_R – скорость волны Рэлея).

Для оценки глубины трещины на выбранном ее участке использовался метод сканирующей конфокальной лазерной микроскопии. На рис. 3 представлено распределение значений глубины трещины для ее фрагмента шириной ~445 мкм, полученное с помощью этого метода.

Анализ изменения параметров трещины, ее ширины, с расстоянием от заряда, позволяет предположить, что при ее формировании и развитии при взрыве существенную роль могут играть два механизма. Под действием волн напряжений происходит множественное первичное образование трещин, а под действием газообразных продуктов их дальнейшее развитие [6–7]. Первичные трещины представляют своеобразные каналы для проникновения газа и реализации механизма внутреннего давления, при котором в первичных трещинах создаются достаточные напряжения для их дальнейшего развития.

Таким образом, в результате проведенных исследований с использованием современных методов микроскопии получены изображения и определены параметры трещины, образовавшейся в условиях взрывного воздействия в граните, что позволило рассмотреть вероятные механизмы ее зарождения и развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород. – М.: Ленанд, 2015. – 368 с.
2. *Ботвина Л. Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
3. *Штрель М. А.* Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материала. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 670 с.
4. *Алексеев А. А.* // International scientific review. – 2015. – № 8. – С. 25–27.
5. Kobayashi A. S., Ramulu M. // Int. J. Fracture. – 1985. – № 27. – P. 187–201.
6. *Адушкин В. В., Спивак А. А.* Геомеханика крупномасштабных взрывов. – М.: Недра, 1993. – 319 с.
7. *Шер Е. Н., Черников А. Г.* // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 12. – С. 299–303. **ГИЛБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 622.02

A.N. Kochanov

MECHANISM OF FRACTURE GROWTH IN GRANITE UNDER EXPLOSION LOAD

Failure of rocks is associated with development of cracks at various scale levels. We have made experimental study using optical, electronic and scanning confocal laser microscopy to assess parameters of cracks that develop after explosive impact. We obtained images of cracks and their reliefs at a variety of degrees of magnification. The crack surface was well structured with a clear-cut ribbing, while granite polished surface was mirror homogeneous. Crack edge and profile irregularity was indicative of a change in the rate of its development associated with generation of a failure localization zone and further intermittent growth. Staging character of failure at local volumes near the crack tip led to its intermittent development. Crack width was found to reach maximum at a certain distance from the explosion center which was important for more accurate description of the mechanism of explosive failure. There are two mechanisms that play a significant role in crack development after explosive impact. Stress waves give rise to primary cracks that develop under the effect of gas. The primary cracks are certain channels for penetration of gas and grow further under its pressure.

Key words: rock, blast loads, crack, experiment, image, optical and electron microscopy, parameters, mechanism

AUTHOR

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, 111020, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Rzhavskiy V.V., Novik G.Ya. *Osnovy fiziki gornykh porod* (Basic physics of rocks), Moscow, Lenand, 2015, 368 p.
2. Botvina L. R. *Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti* (Failure: Kinetics, mechanisms, general regularities), Moscow, Nauka, 2008, 334 p.
3. Shtremel' M. A. *Razrushenie*. Kn. 1. *Razrushenie materiala* (Failure, book 1. Failure of material), Moscow, Izd. Dom MISiS, 2014, 670 p.
4. Alekseev A. A. *International scientific review*. 2015, no 8, pp. 25–27.
5. Kobayashi A. S., Ramulu M. *Int. J. Fracture*. 1985, no 27, pp. 187–201.
6. Adushkin V.V., Spivak A. A. *Geomekhanika krupnomasshtabnykh vzryvov* (Geomechanics of large-scale blasts), Moscow, Nedra, 1993, 319 p.
7. Sher E. N., Chernikov A. G. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2015, no 12, pp. 299–303.

