

Применение рентгеновской компьютерной микротомографии для анализа объемных микроструктурных свойств горных пород

И.Ж. Бунин¹, А.Н. Кочанов¹

¹ *Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4*

Надежная аттестация структурных и прочностных свойств горных пород необходима для эффективного, комплексного освоения недр и предупреждения горных ударов. Разрушение геоматериалов во многом определяется их исходной структурой: формой зерен, наличием пор и микротрещин. Минимальный размер микродефектов в твердом теле может составлять 0.01–0.1 мкм. Изучение геометрии дефектов в объеме требует применения неразрушающих методов с высоким пространственным разрешением. Полученные 3D-данные критически важны для численного моделирования разрушения, в частности, с использованием метода фазового поля, который позволяет описывать сложную топологию трещин без явного отслеживания их границ.

В настоящей работе методами рентгеновской компьютерной микротомографии (РКМТ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) и исследована структура пор и микротрещин в поликристаллическом граните после динамического воздействия.

Методика эксперимента. Образцы представлены в виде фрагментов гранитного блока, подвергнутого лабораторному динамическому нагружению. Исследование поверхности образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JEOL–JSM-5910LV. Для трехмерного анализа внутренней структуры специально подготовленных образцов гранита размерами 2×1×1 мм использовали рентгеновский микротомограф SkyScan 1272. Сканирование выполняли в следующем режиме: разрешение — 1.1 мкм/пиксель; напряжение на источнике — 90 кВ; экспозиция — 4331 мс; фильтрация пучка — 0.5 мм Al + 0.038 мм Cu; шаг вращения объекта — 0.1°. Метод РКМТ основан на реконструкции пространственного распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения. Компьютерная обработка теневых проекций позволяет визуализировать внутреннее строение объектов, содержащих компоненты разной плотности.

Результаты и обсуждение. При анализе пустотного пространства материала выделены два типа дефектов различного генезиса: первичные генетические поры и вторичные трещины деструкции. Образование генетических пор обусловлено природными факторами и связано с геологическими процессами формирования породы. По данным РЭМ, поры имеют округлую морфологию с двумя максимумами распределения по размерам: 1.0–2.5 мкм и около 5.0 мкм. РКМТ-визуализация подтвердила, что в объеме генетические поры (диаметром 1.0–5.0 мкм)

распределены крайне неравномерно: обнаружены как локальные области их скопления, так и зоны, свободные от пор. Общая «томографическая» пористость образца составила ~1.8%.

Второй тип дефектов — микротрещины деструкции — вызван динамическим воздействием на гранит. Они локализованы в зернах кварца, полевого шпата и на их границах. На поверхности образцов длина микротрещин достигает 1.0 мм при ширине (раскрытии) до 50.0 мкм. В объеме образца зафиксирована разветвленная сеть внутренних трещин с раскрытием 3–10 мкм (рис.1). Отдельные фрагменты трещин заполнены более плотным вторичным минералом (отображаются темным цветом), тогда как свободные пустоты имеют белый оттенок.

Анализ экспериментальных данных, полученных методами томографии и микроскопии, показал, что параметры генетических пор на поверхности и в объеме идентичны. При этом трещины деструкции на поверхности имеют большую ширину раскрытия, чем в объеме, что связано со спецификой релаксации напряжений на свободной поверхности.

Результаты 3D-реконструкции реальной геометрии генетических пор и дефектов могут быть импортированы в расчетную среду для последующего математического моделирования методом фазового поля, что позволит в перспективе с высокой точностью описать зоны концентрации напряжений и траектории магистрального разрушения»

Заключение. Совместное применение рентгеновской микротомографии и электронной микроскопии обеспечивает комплексную аттестацию дефектов структуры горных пород. Трехмерная визуализация генетических пор и трещин деструкции создает основу для верификации теоретических моделей физики прочности горных пород, планируемой к реализации в рамках подхода фазового поля.

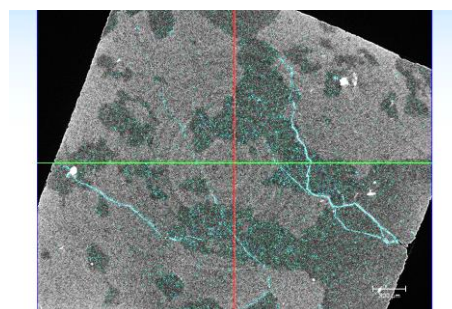


Рис. 1. Изображение микротрещин в граните по данным РКМТ. Масштабная линейка 300 мкм