

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

А.М. Дурягина¹, И.В. Таловина¹, А.А. Штырляева¹, О.А. Попов²

Научный руководитель: д.г.-м.н. И.В. Таловина

¹ Санкт-Петербургский горный университет

Россия, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2, 199106

² Фрайбергская Горная академия, институт Обогащения

Германия, г. Фрайберг, Академиштрассе, 6, 09599

E-mail: gayfutdinovaam@yandex.ru

Анализ статистических данных, которые влияют на эффективность процессов разрушения и дезинтеграции в различных типах машин, показывает, что основное влияние на них (более 60 %) оказывают структурно-текстурные особенности горных пород и руд. Традиционно используемая для изучения структурно-текстурных характеристик горных пород оптическая микроскопия имеет ряд ограничений, связанных не только с описанием объемных параметров структур и текстур, но также и с разрешением изображения. В последние годы появились новые технологии, способные существенно расширить возможности оптико-петрографических исследований. Одним из них является метод рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Принципы работы компьютерного томографа подробно описаны в многочисленных публикациях [1-3]. Суть метода заключается в понижении мощности рентгеновского излучения при его прохождении сквозь некоторый объем вещества за счет фотоэлектрического поглощения, величина которого зависит от атомного номера элемента.

В работе методом КТ было проанализировано три разных в структурно-текстурном отношении образца: медистый песчаник, гранодиорит и кимберлит. Все исследования проводились на микротомографе «SkyScan-1172» (Bruker, Бельгия).

Гранодиорит по данным проведенных рентген-томографических исследований состоит на 89,3 % из кварца и полевого шпата, содержит слюды в количестве 7,7 % и небольшое количество акцессорных минералов. В изученном образце слюды довольно равномерно распределены по всему объему породы, чешуйки их слегка ориентированы и имеют средний размер 0,86 мм. Коэффициент сферичности ($K_{сф}$), рассчитанный как отношение короткой к длинной оси зерна, равен 0,48. Удельная поверхность, рассчитанная как отношение общей поверхности минералов к их объему и отражающая неровность поверхности зерен, минимальная среди всех изученных образцов ($20,2 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$).

Медистый песчаник содержит 5,2% рудных минералов, представленных, главным образом, самородной медью, заключенных в тонкозернистую кварцевую (53,1%) и кальцитовую (40,3%) матрицу. Медные минералы образуют скопления и мелкозернистые агрегаты размером от 0,10 до 0,26 мм со средним размером отдельных зерен 0,07 мм. Сростки чаще всего имеют неровные извилистые очертания и неправильную форму: $K_{сф}$ равен 0,58, удельная поверхность равна $31,86 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.

Кимберлит состоит из мелкокристаллической карбонат-серпентиновой основной массы (26,4%) с вкрапленниками оливина (32,7 %), пироксена (33,5 %), флогопита и включениями акцессорных минералов (7,4 %). Вкрапленники оливина и пироксена чаще всего неправильной формы, имеют сложную морфологию, распределены в породе неравномерно, образуют отдельные скопления размером 1,5-2,6 мм, встречаются также единичные агрегаты зерен размером до 15 мм.

Результаты проведенных исследований сравнивались с данными сертифицированных методик [4], которые показали, что компьютерная рентгеновская микротомография позволяет быстро и достаточно точно охарактеризовать ряд морфометрических параметров. Несомненным достоинством метода является также возможность 2D- и 3D-визуализации данных при помощи специализированных программ STvox и STan (Bruker, Бельгия), которые помогают проанализировать не только размеры зерен и их агрегатов, но и их распределение в общем объеме породы и взаимоотношения друг с другом. Стоит отметить, однако, и ограничения метода КТ. Возможности томографа не позволяют, например, выделять отдельные зерна минералов с близкой рентгеновской плотностью, во всяком случае, без проведения дополнительных оптико-петрографических или электронно-микроскопических исследований. Максимально эффективно методом КТ отличаются рудные минералы с высокой рентгеновской плотностью (самородные элементы, сульфиды и оксиды металлов) от силикатной матрицы (кварц, полевой шпат, оливины, пироксены, амфиболы) и т.д., в то время как, к примеру,

кварц и полевой шпат отличить друг от друга довольно проблематично в виду их близкой рентгеновской плотности. Кроме того, по этой же причине томограф анализирует часто не отдельные зерна минералов, а их сростки, в связи с чем возможны более высокие значения среднего диаметра зерен и их агрегатов.

Помимо морфометрических показателей методом КТ были изучены параметры порового пространства образцов. Именно фактор пористости часто является определяющим при интерпретации прочностных характеристик породы и ее поведения в процессе дезинтеграции, так как разрушение происходит по наиболее ослабленным зонам – границам срастаний отдельных минеральных фаз, трещинам и т.д.[5]. Изучение параметров порового пространства образцов методами КТ показало, что во всех трех образцах развиты поры в основном субкапиллярного и капиллярного размера, встречаются также единичные поры диаметром более 0,1 мм. Общая пористость образца гранодиорита составляет 3,05%, медистого песчаника 1,4%, кимберлита – 0,13%. При сравнительном анализе характеристик порового пространства образцов было выявлено, что несмотря на самую высокую общую пористость, гранодиорит обладает минимальной плотностью пор (2,03 мм⁻³), рассчитанной как количество пор на единицу объема, что благодаря небольшим размерам пор (15-40 мкм) и их изометричной форме (Ксф 0,80) приводит к повышению прочности самой породы. Медистый песчаник обладает промежуточными параметрами порового пространства и средней прочностью, а кимберлит минимальной прочностью при минимальных параметрах общей пористости и максимальных значениях плотности пор. Таким образом, параметры пористости, полученные методом КТ, коррелируются с различиями в прочности пород, а именно с индексом прочности $I_s(50)$ [4], тогда как общая пористость, определяемая по величинам минеральной и объемной плотностей, позволяет лишь косвенно судить о прочности породы и не дает информации о размерах, форме пор, их сообщаемости и пространственной ориентации. С этой точки зрения рентгеновская микротомография дает ценную информацию для прогнозирования поведения породы в процессе дезинтеграции.

Таким образом, проведенные нами исследования свидетельствуют о перспективности метода, заключающейся в возможности получения не только количественных характеристик минеральных фаз, но и порового пространства породы. Широкие возможности 3D-визуализации полученных данных при незначительных временных затратах, быстрота и неdestructивность метода являются несомненным преимуществом рентгеновской микротомографии, позволяющей использовать этот метод в широком диапазоне исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штырляева А.А., Журавлев А.В., Герасимова А.И. Перспективы и проблемы использования компьютерной микротомографии для изучения образцов керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика 2016. Т.11. №1. http://dx.doi.org/10.17353/2070-5379/8_2016
2. Evans, C.L., et al. Quantifying mineral grain size distributions for process modelling using X-ray micro-tomography // Mineral Engineering. 2015 <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.026>
3. Willson, C.W., Lu, N. and Likos, W.J. Quantification of grain, pore and fluid microstructure of unsaturated sand from X-Ray CT images // Geotechnical Testing Journal. Vol. 35. № 6. 2012. doi:10.1520/GTJ20120075
4. Popov, O., Lieberwirth, H., Folgner, T. Quantitative Charakterisierung der Festgesteine zur Prognostizierung des Gesteinseinflusses auf relevante Produkteigenschaften und Systemkenngrößen. Teil 1: Anwendung der quantitativen Gefügeanalyse // AT Mineral Processing. 0708 Bauverlag. 2014
5. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Исследование физико-механических свойств строительных
6. горных пород, влияющих на их дезинтеграцию и качество конечной продукции // Сборник тезисов международного совещания «Плаксинские чтения 2013», г. Томск. 2013. С. 7-12.