УДК 539.3

ОЦЕНКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕННОЙ СОЛИ, СИЛЬВИНИТА И КАРНАЛЛИТА НА УСТАНОВКЕ NANOTEST-600

© 2011 г.

В.Н. Аптуков, А.П. Скачков

Пермский госуниверситет

aptukov@psu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Представлены результаты исследований микромеханических свойств (модуль упругости и микротвердость) отдельных зерен и межзеренных границ сильвина, галита и карналлита на установке NanoTest-600. Проведена оценка вероятностных характеристик микрорельефа поверхности сильвина на основе измерений профиля поверхности путем определения параметров Херста отдельных сегментов экспериментального ряда данных. Результаты могут быть использованы при формулировке моделей деформирования и разрушения минерального агрегата соляных пород.

Ключевые слова: каменная соль, сильвинит, карналлит, микромеханические характеристики, межзеренные границы, NanoTest-600, параметр Херста.

Микромеханические характеристики

Определение механических свойств отдельных минеральных фракций соляных пород в микро- и нанодиапазоне представляет определенный интерес как для выяснения влияния структурных факторов на прочность, так и с точки зрения изучения роли минеральных наночастиц в техно-природных процессах, происходящих при разработке полезных ископаемых. Этапу построения различных теорий должна предшествовать фаза накопления экспериментальных данных, в том числе и о механических характеристиках элементов структуры на различных масштабных уровнях. Место отбора образцов сильвинита – Второй Соликамский рудник (пласт Вс, слои №2 и № 4), подстилающей каменной соли – Четвертый Березниковский рудник, карналлита – Первый Соликамский рудник (пласт Вк, четные слои).

Эксперименты проводили на установке NanoTest-600 путем вдавливания пирамиды Берковича в образец с усилием 500 мН. На каждом образце выбирали сравнительно ровный участок, в пределах которого проводили около 100 индентирований (10×10 точек) с шагом 30 мкм. Были испытаны образцы фрагментов зерен сильвинита: (А) прозрачная фракция галита, (Б) прозрачная фракция галита с поверхностным голубым окрасом, (В) красная фракция сильвина, (Г) молочно-белая фракция сильвина; подстилающей каменной соли: (Д) прозрачные кристаллы галита, (Е) темно-серые кристаллы галита; карналлита: мясо-красная (Ж) и янтарно-перламутровая фракция (З), серая фракция (И) – предположительно зерна галита, белая пенистая фракция (К). Некоторые результаты испытаний по приведенному модулю E^*, твердости H, модулю упругости E, модулю сдвига G и объемному модулю K представлены в таблице 1.

Таблица 1

Фракция	E^*, ГПа	H, ГПа	E, ГПа	G, ГПа	K, ГПа
А	61.5±8.0	0.34±0.08	59.1±7.3	22.8±2.8	49.3±6.1
Б	64.3±12.0	0.35±0.08	62.0± 1.0	23.9±4.3	51.7±9.2
В	20.6±7.0	0.29±0.06	19.1±6.4	7.3±2.5	15.9±5.3
Г	29.4±4.1	0.23±0.03	27.4±3.7	10.5±1.4	22.8±3.0
Д	57.0±8.1	0.29±0.05	54.6±7.3	21.0±2.8	45.5±6.1
Е	59.5±6.0	0.36±0.08	57.1±5.5	22.0±2.1	47.6±4.6
Ж	30.3±4.7	0.35±0.11	28.3±4.3	10.9±1.6	23.6±3.6
З	25.2±15.0	0.18±0.09	23.4±13.8	9.0±5.3	19.5±11.5
И	20.6±14.9	0.19±0.09	19.1±13.5	7.4±5.2	15.9±11.3
К	3.9±1.4	0.05±0.01	3.6±1.3	1.4±0.5	3.0±1.1

Сильвинит состоит из фракций с различными механическими характеристиками, отличающимися по модулю Юнга в 2–3 раза, а по твердости – на 20–50%. Свойства галита, входящего как в состав каменной соли (прозрачный и темно-серый), так и в состав сильвинита (прозрачный и с голубым поверхностным окрасом), практически одинаковы (отличие 12–20%). Небольшое отличие фракций по твердости позволяет объяснить сравнительно близкие прочностные характеристики сильвинита и каменной соли. По модулю Юнга мясо-красная фракция карналлита наиболее близка к молочно-белой фракции сильвина, а по микротвердости – к прозрачным и темно-серым кристаллам галита. Для янтарно-перламутровой фракции карналлита твердость ниже почти в два раза, чем для мясо-красной фракции, а модуль Юнга – на 20%. Серая фракция, входящая в состав этих образцов, имеет приблизительно те же параметры.

При проведении 400 индентирований на площадке 190×190 мкм удалось исследовать окрестность изгибающейся границы вблизи угловой точки граничащих зерен молочно-белой фракции сильвина. На рис. 1 изображена поверхность приведенного модуля упругости (ГПа) в окрестности угловой точки.

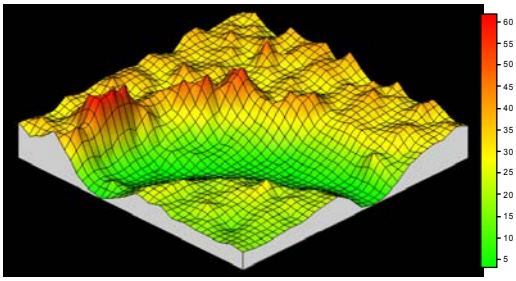

Рис. 1

Установлено, что на участке изгибающейся границы шириной около 10–20 мкм модуль E^* составляет 5-6 ГПа, а модули зерен – 18–22 и 28–32 ГПа. В отдельных локальных областях (см. рис. 1) модули достигают величин 40–50 ГПа и выше. Микротвердость межзеренной границы $H = 0.03$–0.05 ГПа также значительно ниже микротвердости окружающих зерен $H = 0.20$–0.25 ГПа и $H = 0.30$–0.50 ГПа.

Характеристики микрорельефа

Проведена оценка вероятностных характеристик микрорельефа поверхности сильвина на основе измерений профиля поверхности путем определения параметров Херста отдельных сегментов экспериментального ряда данных. Показатель (параметр) Херста H определяется как угловой коэффициент наклона линии регрессии эмпирической зависимости, построенной в двойных логарифмических координатах $R/S = (\tau/2)^H$, где R/S – нормированный размах, τ – период (длина ряда) наблюдений.

Высота профиля замерялась вдоль системы параллельных линий, количество точек измерений вдоль одной линии около 2500. Для каждой линии рассматривалось три варианта статистической обработки: в прямом направлении; в обратном направлении; в обоих направлениях от центра линии.

В качестве примера на рис. 2 показана зависимость нормированного размаха от числа испытаний, построенная в логарифмических координатах, и соответствующая линия регрессии, по которой определялся параметр Херста.

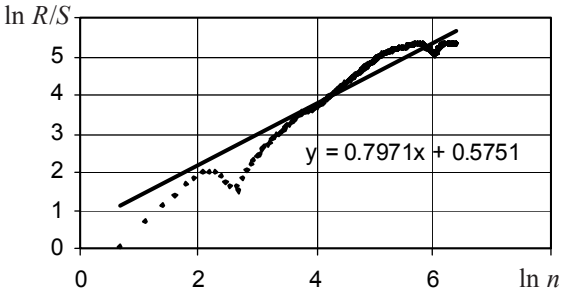

Рис. 2

Обнаружено устойчивое отличие показателей Херста на разных отрезках ($H \sim 0.8$–1.05), что говорит о качественно различном характере геометрии поверхности отдельных сегментов кристалла сильвина.

Представленные данные могут быть использованы при формулировке моделей деформирования и разрушения минерального агрегата как представительного элемента геоматериала.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность профессору С.А. Константиновой за обсуждение постановки задачи и результатов исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/5135).

ESTIMATION OF MICROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCK SALT, SYLVINITE AND CARNALLITE BY NANOTEST-600

V.N. Aptukov, A.P. Skachkov

The paper presents the results of the investigations of micromechanical characteristics (coefficient of elasticity and microhardness) of sylvinite, halite and carnallite particular grains and grain boundaries performed on the NanoTest-600. Probabilistic characteristics of the sylvinite surface microrelief are estimated on the basis of surface profile alterations by finding Hurst parameters for particular segments of experimental data series. These results can be used for developing deformation models and breakout patterns of salt rock mineral aggregate.

Keywords: rock salt, sylvinite, carnallite, micromechanical characteristics, grain boundaries, NanoTest-600, Hurst parameter.