

УДК 622.02

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ
МИКРО- И НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ**

**С. Д. Викторов¹, Ю. И. Головин², А. Н. Кочанов¹, А. И. Тюрин²,
А. В. Шуклинов², И. А. Шуварин², Т. С. Пирожкова²**

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: victorov_s@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

²*НОЦ “Нанотехнологии и наноматериалы”, E-mail: golovin@tsu.tmb.ru,
Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина,
Защитный пер., 7, 392000, г. Тамбов, Россия*

Рассматриваются некоторые методические вопросы и результаты применения метода микро- и наноиндентирования для исследования процессов локального деформирования и разрушения горных пород. Методом микро- и наноиндентирования определены численные значения модуля Юнга, твердости горных пород и их минеральных компонентов. Получены значения вязкости разрушения как для отдельных минералов, так и на их межзеренных границах раздела. Отмечается перспективность использования данного метода для оценки прочностных и деформационных характеристик горных пород.

Горная порода, локальное разрушение, микро- и наноиндентирование, метод, индентор, вдавливание, физико-механические свойства, твердость порообразующих минералов, вязкость разрушения, определение, структура

Выбор технических средств и технологий разработки полезных ископаемых во многом обусловлен физико-механическими свойствами массива горных пород, изучению и определению параметров которых посвящены многочисленные экспериментальные исследования [1–6]. Закономерности протекания одного из основных технологических процессов горного производства — разрушения массива горных пород, осуществляемого в промышленном масштабе буровзрывным или механическим способами, — определяются прочностными и деформационными характеристиками, важными показателями которых являются твердость, модуль Юнга, вязкость разрушения.

Показатель твердости представляет собой прочностную характеристику, но в отличие от пределов прочности, характеризующих сопротивление горных пород объемному разрушению, твердость отражает сопротивляемость поверхностных слоев горных пород местному воздействию. Различают агрегатную твердость горных пород и твердость отдельных минералов, слагающих горную породу. Агрегатная твердость горной породы больше влияет на скорость бурения, а твердость отдельных минералов определяет износ разрушающего инструмента, т. е.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00446).

абразивность породы. Для определения агрегатной твердости разработаны методы, заключающиеся во вдавливании штампа различной конфигурации в поверхность материала. Вдавливание штампа в полированную поверхность образца как метод определения агрегатной твердости горных пород впервые предложил Л. А. Шрейнер [4]. При этом площадь основания штампа при испытаниях пород составляла 1–2 мм². Такие исследования проводились на рубеже 50–70-х годов прошлого века.

Следует также отметить, что для оценки твердости минералов широкое распространение получила шкала Мооса. Между числом твердости по Моосу и показателем абразивности существует достаточно выраженная корреляционная связь [6]. Средневзвешенное значение твердости по этой шкале, если известен петрографический состав породы и твердость отдельных минералов, определяется выражением

$$H_c = (h_c^1 m_1 + h_c^2 m_2 + \dots + h_c^i m_i) / 100,$$

где h_c^1, h_c^2, h_c^i — микротвердости пороодообразующих минералов; m_1, m_2, \dots, m_i — процентное содержание соответствующих минералов в породе.

С появлением нового класса оборудования простейший прием измерения твердости как отношения силы вдавливания индентора в материал к площади его отпечатка превратился в метод, позволяющий изучать деформационные и прочностные характеристики поверхностных микро- и нанообластей различных материалов [7–19]. Метод микро- и наноиндентирования характеризуется не только малыми усилиями нагрузок, но в отличие от обычных испытаний, подразумевающих единичное определение твердости по отпечатку индентора, предполагает оценку возникающего усилия и глубины проникновения с нанометровым разрешением как при внедрении индентора в поверхность материала, так и при его обратном движении. При этом осуществляется непрерывный мониторинг в реальном времени кинетики погружения индентора известной геометрии в поверхность исследуемого материала под действием заданной силы нагружения. Анализ получаемой в результате такого испытания диаграммы нагружения, аналогичной традиционной для одноосного сжатия диаграмме “напряжение–деформация”, дает возможность оценки более десяти механических характеристик, в том числе твердости, модуля Юнга и вязкости разрушения.

На рис. 1 представлена зависимость получаемых данных “нагрузка–смещение” при испытаниях материалов методом микро- и наноиндентирования. За начало отсчета принимается точка, в которой начинается контакт индентора и испытываемой поверхности.

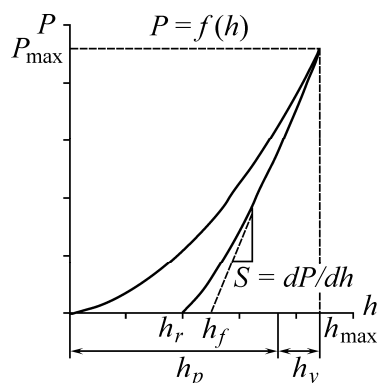


Рис. 1. Типичная диаграмма “нагрузка–смещение” при испытаниях методом микро- и наноиндентирования: h_r — глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки; h_f — глубина упругого возврата; h_p — глубина пластического отпечатка при максимальной нагрузке, приложенной к индентору P_{max} ; h_y — упругий прогиб поверхности образца

С увеличением нагрузки на индентор происходит его проникновение в испытываемую поверхность на максимальную глубину h_{\max} , затем, когда индентор отводят от образца, происходит разгрузка и упругое восстановление h_f . Именно упругое восстановление позволяет вычислить так называемый приведенный модуль Юнга, который находится из выражения [10, 11]

$$E = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}},$$

где $S = dP/dh$ — упругая жесткость; A — площадь контакта; β — константа, близкая к единице.

Площадь контакта A индентора, получаемая экспериментально, в соответствии с методикой наноиндентирования [10, 11] аппроксимируется зависимостью вида

$$A = C_0 h_p^2 + \sum_{i=1}^n C_i h_p^{1/m},$$

где $m = 1, 2, 4, 8, 16, 32$; h_p — глубина пластического отпечатка при максимальной нагрузке на индентор; C_i — числовые коэффициенты учитывающие форму реального индентора; C_0 — числовой коэффициент, учитывающий тип и геометрию используемого индентора (для индентора Берковича $C_0 = 24.5$).

Твердость определяется как отношение нагрузки к площади контакта воздействия:

$$H = P_{\max} / A,$$

где P_{\max} — максимальная нагрузка, приложенная к индентору.

В качестве меры сопротивления хрупкому разрушению используется параметр вязкости разрушения (критический коэффициент интенсивности напряжения K_{Ic}). Для экспериментального определения вязкости разрушения образец стандартных размеров и формы с заранее образованной трещиной известной длины испытывают на одноосное растяжение или изгиб, доводя его до полного разрушения. Критическое напряжение σ_c , соответствующее развитию зародышевой трещины длиной ℓ , определяет значения K_{Ic}

$$K_{Ic} = k_f \sigma_c \sqrt{\ell},$$

где k_f — безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии образца и схемы нагружения.

Следует отметить, что реализация экспериментов требует большого числа специально подготовленных образцов с наведенной трещиной, что обуславливает их высокую трудоемкость. Замена стандартных методов более простыми средствами определения вязкости разрушения весьма желательна, и один из возможных путей решения этой проблемы — микро- и наноиндентирование при локальном разрушении материала. Использовать локальное разрушение сосредоточенной нагрузкой для оценки вязкости разрушения и несколько критериев для количественной оценки этого свойства хрупких материалов предложено в работе [20]. В настоящее время исследован большой круг материалов, представлено большое количество формул, связывающих критический коэффициент интенсивности напряжения, определяемый методами индентирования K_c , с величиной нагрузки P и длиной образовавшихся трещин около отпечатка C [7–9]. Для определения величины K_c по длине радиальных трещин C и приложенной силе P далее в работе использовано соотношение вида [9]

$$K_c = k \left(\frac{a}{C-a} \right) (E/H)^{2/3} \frac{P}{C^{3/2}},$$

где k — калибровочный коэффициент, зависящий от формы индентора; a — характерный размер отпечатка (для индентора Берковича $k = 0.0161$, $a = b/\sqrt{3}$, b — сторона отпечатка [9]).

Эта формула с успехом применялась для многих материалов и для большого диапазона нагрузок показала хорошее согласие с данными разрушающих макроиспытаний.

С целью определения рассмотренных выше параметров горных пород проведены испытания методом микро- и наноиндентирования. Макро-, микро- и наноиндентирование осуществлено на твердомере Duramin A300, Struers (Германия), микротвердомере ПМТ-3М, ЛОМО (Россия) и трибонаноиндентометре Ti-950, Hysitron (США). Для исследования вязкости разрушения различных минеральных компонентов и их межзеренных границ использован динамический наноиндентометр ПМТ-НИ (разработка НОЦ “Нанотехнологии и наноматериалы” ТГУ им. Г. Р. Державина). При проведении испытаний применялся трехгранный алмазный индентор Берковича. Прикладываемая нагрузка P варьировалась в диапазоне от 1 мкН до 500 мН. Результаты получены усреднением данных не менее чем по 15 отпечаткам, нанесенным в одинаковых условиях. Длина трещин в углах отпечатка измерялась с помощью оптического микроскопа Axio Observer, Carl Zeiss (Германия). Контроль структурно-фазового состояния и элементного состава проводился на двухлучевом электронно-ионном микроскопе Neon 40, Carl Zeiss (Германия) с приставкой для энергодисперсионного анализа характеристического рентгеновского излучения Incaact, Oxford Instruments (Англия). Пробоподготовка образцов горных пород осуществлялась с помощью комплекса оборудования фирмы Buchler (Германия).

Для первоначальных исследований методом микро- и наноиндентирования выбраны образцы железистого кварцита КМА. Основными пороодообразующими минералами железистых кварцитов являлись магнетит, кварц и гематит, содержание которых соответственно составляло 60, 37 и 3 %, а общий элементный состав представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Элементный состав железистого кварцита, %

Элемент	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Ni
Весовой	50.28	1.06	0.34	29.78	0.55	0.17	17.67	0.15
Атомный	68.37	0.95	0.28	23.07	0.31	0.09	6.88	0.06

Для характеристики структурных особенностей образцов использовалась оптическая микроскопия. Средний размер зерен всех исследованных проб руды составляет для магнетита и кварца 55 ± 16 мкм, для гематита 5–10 мкм. Отчетливо выявляется характерная структура и кристаллический характер большинства межзеренных границ (рис. 2).

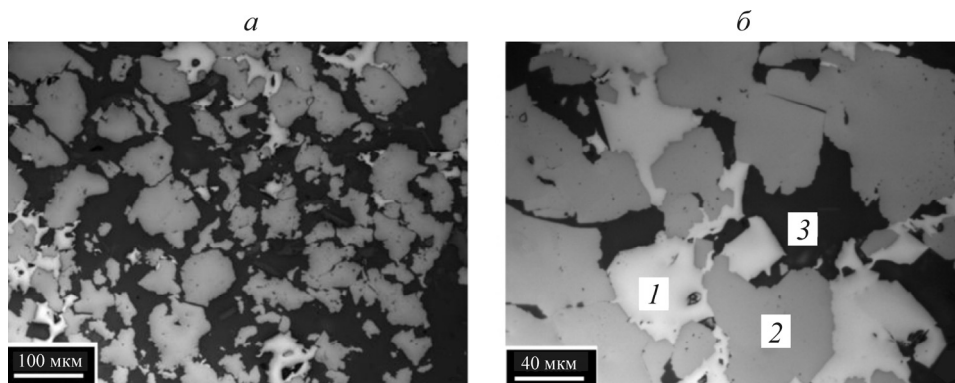


Рис. 2. Оптическое изображение поверхности образца железистого кварцита при увеличении 100 (а) и 250 (б): 1 — гематит; 2 — магнетит; 3 — кварц

Для получения адекватных экспериментальных данных необходимо правильно выбрать параметры индентирования, в которых одним из ключевых является глубина проникновения индентора h , определяющая размеры деформированной области.

Радиус этой области составляет $R \sim 10D$, где D — диагональ отпечатка.

С учетом геометрии индентора сторона отпечатка $a = 7.44h$ (для индентора Берковича), а диагональ отпечатка $D = 7h$ (для индентора Виккерса). Поэтому, задавая глубину проникновения индентора, можно оценить объем деформируемого материала под индентором. Совокупность информации об этом объеме и данных структурных исследований определяют, какие элементы внутренней структуры образца участвуют в деформационном процессе.

Казалось бы, чем больше глубина отпечатка h , тем больше область образца, участвующая в деформационном процессе, и тем более интегральной характеристикой будет являться твердость H . В предельном случае этот метод будет отличаться от одноосного сжатия только формой нажимающего плунжера и образец будет испытывать раскалывающие напряжения в плоскости, перпендикулярной оси деформирования. Однако индентирование на сверхбольшие глубины сопряжено с большим числом инструментальных трудностей, а также сопровождается множественным растрескиванием локальной области вокруг индентора.

С ростом силы P и глубины проникновения индентора меняется не только характерный размер локально деформированной области, но и соотношение между упругой и пластической деформацией. На начальной стадии нагружения индентора вся деформация является чисто упругой и может быть рассчитана по теории контактной упругости. Дальнейший рост силы вызывает значительную пластическую деформацию, существенно искажающую поле упругих напряжений под индентором. В этом случае необходим одновременный учет и упругой и пластической деформации. Еще большее увеличение P приводит к образованию отпечатка, в котором для ряда материалов вкладом упругой деформации в первом приближении можно пренебречь ввиду ее малой доли.

Положение границ между этими деформационными состояниями весьма условны в шкале как нагрузок, так и глубин нагружения. В первую очередь они зависят от природы материала, температуры и радиуса закругления в вершине индентора. Ориентировочно упругопластичный переход при тестировании индентором Берковича с $R = 100 - 200$ нм происходит при нагрузке в десятки–сотни микроньютонов, чему соответствует глубина отпечатка в единицы–десятки нанометров. Для инденторов с $R > 1 - 10$ мкм эти значения могут быть значительно больше. Реализация развитой пластической деформации обычно требует силы от единиц до многих сотен микроньютонов, чему отвечает глубина погружения индентора $h \gg 1 - 10$ мкм. В этой связи подобные испытания называют микроиндентированием. Наконец, при $P \gg 1$ Н и $h \gg 10$ мкм возникает макроотпечаток с поперечником около 1 мм, который анализируют традиционными методами.

На рис. 3 представлены характерные $P-h$ диаграммы (кривые нагружения–разгрузки), полученные по результатам микро- и наноиндентирования образца железистого кварцита. Они свидетельствуют о том, что при увеличении глубины внедрения от 100 до 1000 нм характер этих кривых не меняется.

На рис. 4 показаны зависимости твердости H и модуля Юнга E минеральных компонентов железистого кварцита от глубины внедрения. По мере увеличения глубины проникновения индентора в большинстве случаев отмечается спад твердости, эта тенденция наблюдается для всех минеральных компонентов (рис. 4а). С увеличением глубины внедрения происходит также уменьшение значений модуля Юнга для всех породообразующих минералов вплоть до глубины 500–600 нм, затем, при дальнейшем увеличении глубины внедрения, значения модуля Юнга остаются неизменными (рис. 4б).

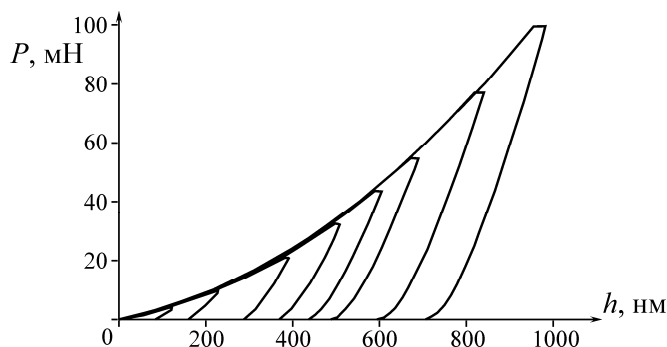


Рис. 3. Кривые нагружения – разгрузки, полученные по результатам экспериментов для образца железистого кварцита

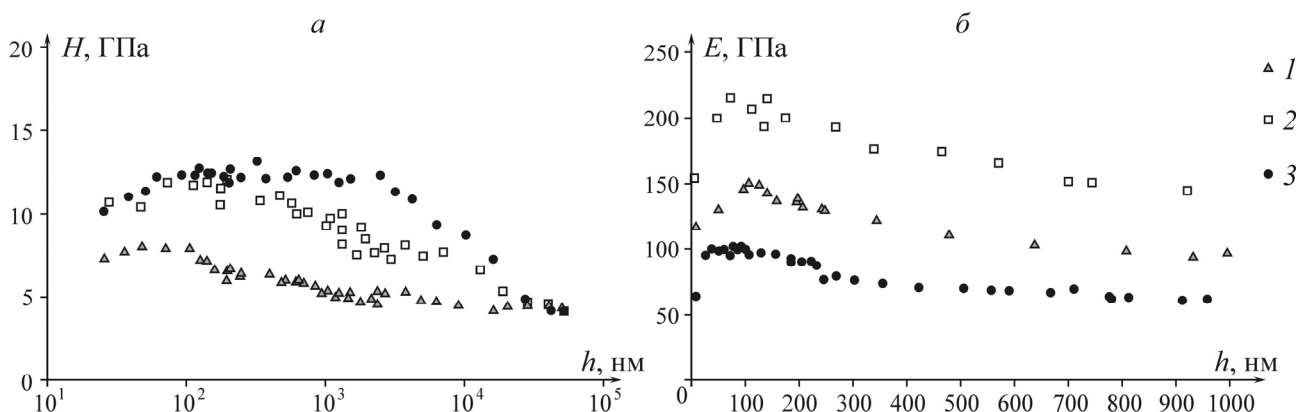


Рис. 4. Зависимость твердости H (а), модуля Юнга E (б) от глубины отпечатка h для минеральных компонентов: 1 — гематит; 2 — магнетит; 3 — кварц

Представляет интерес сопоставление величин H и E , полученных в опытах по наноиндентированию, с экспериментальными результатами, полученными обычным путем. Так, для кварца $H = 8.8–12.1$ ГПа, $E = 100$ ГПа; для магнетита $H = 7.9$ ГПа, $E = 100–235$ ГПа; для гематита $H = 4.4–5.1$, $E = 210$ ГПа. Здесь в качестве твердости приведены данные, полученные на микротвердомере ПМТ-3 [21], результаты по модулю Юнга взяты из справочных данных [22, 23]. По шкале Мооса кварц имеет твердость 7.0–7.5 ГПа, а гематит и магнетит 5.5–6.5 ГПа. Сравнение этих данных позволяет сделать вывод о том, что результаты определения H и E различными методами сопоставимы. Следует иметь в виду, что на значения твердости при индентировании может влиять масштабный фактор. Масштабный эффект, т. е. влияние глубины внедрения индентора на деформационные характеристики, может быть связан с невыполнением закона подобия, с неоднородностью поверхностных слоев исследуемых образцов и другими факторами [7, 12–19]. Для весьма малых нагрузок (10 мН и менее) важную роль играет топография поверхности. Кроме того, нужно учитывать, что измерения при малых и сверхмалых нагрузках сопровождаются резким повышением погрешности, особенно при измерении твердости.

Для отдельных минеральных компонентов кварцита и границ раздела отдельных минеральных фаз определены значения вязкости разрушения K_c (рис. 5). Можно отметить довольно низкую вязкость разрушения как отдельных кварцевых зерен $K_c = 0.5$ МПа·м^{1/2}, так и границ срастания зерен кварц-магнетит и кварц-гематит. Полученные значения примерно 2–3 раза меньше, чем на границе срастания зерен минералов магнетит-гематит (рис. 6). Согласно

справочным данным, для большинства горных пород значения вязкости разрушения составляют $K_{Ic} = 0.5 - 2.0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, в то время как, например, хрупкие керамики имеют $K_{Ic} = 5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, высокопрочные стали $K_{Ic} = 50 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Это означает, что в результате экспериментов методом микро- и наноиндентирования получены сопоставимые значения вязкости разрушения с данными при испытаниях на изгиб или растяжение образцов с трещиной.

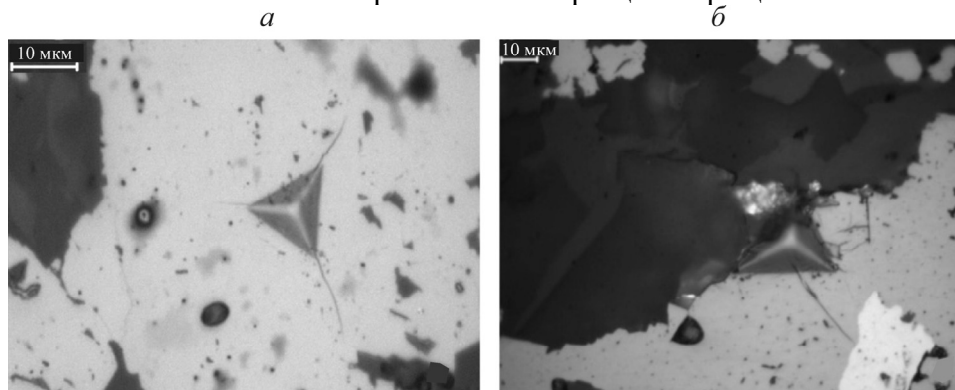


Рис. 5. Вид отпечатка индентора и микротрещин в гематите (а) и на границе между магнетитом и кварцем (б)

Определение твердости и модуля Юнга проведены также для образцов песчаника, гранита и доломита при глубине внедрения индентора 900 нм. Песчаник — кварцевый, слюдястый, мелкозернистый — представляет собой конгломерат практически нетрещиноватых зерен кварца. Содержание кварца 99 %, средний размер зерен 0.21–0.29 мм, размер пор 0.06–0.13 мм, пористость 7–9 %. Гранит — структура полнокристаллическая, мелко-среднезернистая, текстура преимущественно массивная, его главные породообразующие минералы — натриево-калиевый полевой шпат, кварц, плагиоклаз. Содержание натриево-калиевых полевых шпатов, которые представлены микроклином и ортоклазом, составляет 37–42 %, кварца — 24–30 %, плагиоклазов — 18–22 %. Доломит — осадочная порода, на 95 % состоящая из минерала доломита.

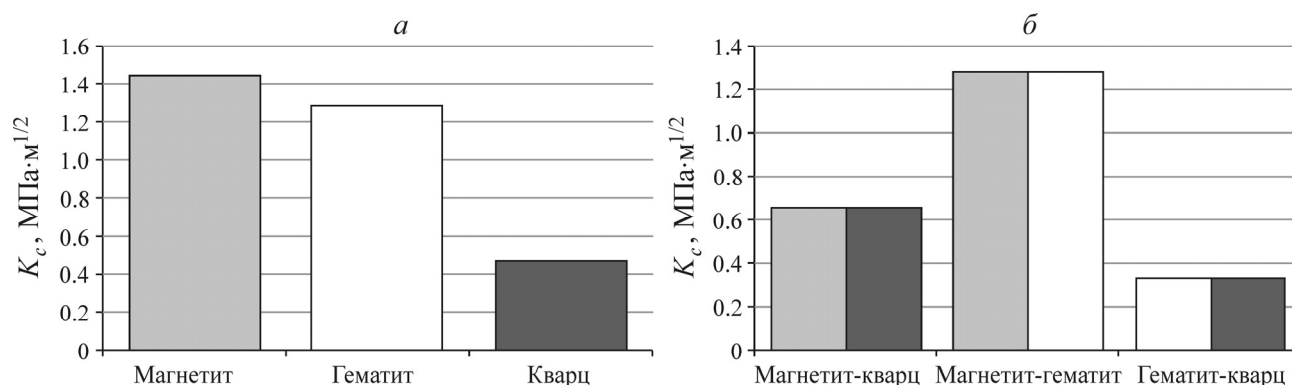


Рис. 6. Значения вязкости разрушения для породообразующих минералов (а) и на границе их зерен (б)

Некоторые результаты исследований в виде диапазона изменения параметров твердости и модуля Юнга для горных пород приведены в табл. 2. Для образца кварцевого песчаника отмечается значительная вариация модуля Юнга и твердости, значения которых различались в 2 раза и более. При стандартных испытания образцов песчаника на сжатие также отмечается значительный разброс значений предела прочности на сжатие, что свидетельствует о его неоднородности как на микро-, так и на макромасштабном уровне.

ТАБЛИЦА 2. Значения твердости и модуля Юнга для образцов горных пород, ГПа

Показатель	Гранит	Доломит	Песчаник
Модуль Юнга E	70.9–76.3	53.2–81.8	50.0–105.2
Твердость H	8.6–10.1	3.5–7.5	4.0–11.6

Неоднородность горной породы по какому-либо вещественному свойству определяет характер и закономерности протекания процессов деформирования и разрушения горных пород, влияет и может приводить к увеличению или снижению, например, абразивной способности горной породы. Метод микро- и наноиндентирования позволяет определять степень неоднородности поверхности образцов по распределению значений твердости при различной глубине внедрения индентора. Степень неоднородности породы по твердости, как и по любому ее свойству, оценивается коэффициентом вариации $K_{\text{вар}}$ ($K_{\text{вар}} = \sigma / H_{\text{ср}}$, где σ — среднее квадратичное отклонение, $H_{\text{ср}}$ — среднее значение показателя твердости в анализируемой выборке).

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований методом микро- и наноиндентирования определены прочностные и деформационные характеристики горных пород и их минеральных компонентов при различной глубине внедрения индентора. Отмечаются высокие значения твердости кварца при его сравнительно низкой вязкости разрушения в пределах отдельных зерен и межзеренных границ с магнетитом и гематитом, а также значительная вариация значений модуля Юнга и твердости для образца песчаника. Оценка твердости отдельных минеральных компонентов позволяет рассчитать значения средневзвешенного показателя твердости горных пород по шкале Мооса.

Исследования показали перспективность использования метода микро- и наноиндентирования для оценки прочностных и деформационных характеристик горных пород, степени их неоднородности. Представляется возможной замена стандартных испытаний образцов большого размера на сжатие многократными неразрушающими испытаниями методом микро- и наноиндентирования. Дальнейшего обсуждения требуют вопросы абсолютных значений физико-механических свойств горных пород, определяемых методами микро- и наноиндентирования, в связи с масштабным эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Открытые** горные работы: справочник / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников и др. — М.: Горное бюро, 1994.
2. **Опарин В. Н., Танайно А. С., Юшкин В. Ф.** О дискретных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // ФТПРПИ. — 2007. — № 3.
3. **Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф.** Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969.
4. **Шрейнер Л. А.** Механические и абразивные свойства горных пород. — М.: Гостоптехиздат, 1958.
5. **Барон Л. И.** Горно-технологическое породоведение. — М.: Наука, 1977.
6. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Оценка абразивной способности горных пород по их физико-механическим свойствам // ФТПРПИ. — 2009. — № 3.
7. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009.
8. **Springer Handbook of Nanotechnology**, ed. by B. Bushan, Berlin: Springer, 2007.

9. **Fischer-Cripps A. C.** Nanoindentation, Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2011.
10. **Oliver W. C., Pharr G. M.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiment, *J. Mater. Res.*, 1992, Vol. 7, No. 6.
11. **Oliver W. C., Pharr G. M.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. Mater. Res.*, 2004, Vol. 19, No. 1.
12. **Головин Ю. И.** Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // ФТТ. — 2008 — Т. 50. — Вып. 12.
13. **Golovin Yu. I., Tyurin A. I., Farber V. Ya.** Time-Dependent Characteristics of Materials And Micromechanisms of Plastic Deformation on a Submicron Scale by a New Pulse Indentation Technique, *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*, 2002, Vol. 82, No. 10 SPEC.
14. **Головин Ю. И., Иунин Ю. Л., Тюрин А. И.** Скоростная чувствительность твердости кристаллических материалов в условиях динамического наноиндентирования // Докл. РАН. — 2003. — Т. 392. — № 3.
15. **Головин Ю. И., Тюрин А. И., Хлебников В. В.** Влияние режимов динамического наноиндентирования на коэффициент скоростной чувствительности твердости тел различной структуры // ЖТФ. — 2005. — Т. 75. — № 4.
16. **Головин Ю. И., Дуб С. Н., Иволгин В. И., Коренков В. В., Тюрин А. И.** Кинетические особенности деформации твердых тел в нано- и микрообъемах // ФТТ. — 2005. — Т. 47. — № 6.
17. **Головин Ю. И., Тюрин А. И.** Динамика начальной стадии микроиндентирования ионных кристаллов // Изв. РАН. Серия физическая. — 1995. — Т. 59. — № 10.
18. **Ананьев П. П., Головин Ю. И., Ермаков С. В., Купряшкин А. М., Плотникова А. В., Тюрин А. И.** Влияние магнитно-импульсной обработки железистых кварцитов на коэффициент вязкости разрушения на границе фаз // ГИАБ. — 2013. — № 2.
19. **Tjurin A. I., Shuvarin I. A., Pirozhkova T. S.** Influenza del tipo e dell'entità delle condizioni di carico applicato penetratore duttile-fragile transizione, *Italian Science Review*, 2014, Vol. 1(10).
20. **Palmqvist S.** Method att BestammaSegheten hos Spread hos Spread Material, *SarskiltHardmetaller, Jernkortorests Ann*, 1957, Vol. 141.
21. **Илларионов А. А.** Петрография и минералогия железистых кварцитов Михайловского месторождения Курской магнитной аномалии. — М.: Наука, 1965.
22. **Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова.** — М.: Недра, 1975.
23. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — 4-е изд. — М., 1984.

Поступила в редакцию 14/V 2014