

УДК 622.636

В.А. Луняков, М.В. Колдаева, П.П. Ананьев

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗИСТОГО КВАРЦИТА

Проведено сравнение микротвердости агрегатов полиминерального железистого кварцита до и после магнитно-импульсной обработки. Качественно показано, что гистограммы распределения микротвердости магнетита, гематита и кварца меняются в результате обработки.

Ключевые слова: железистый кварцит, магнитно-импульсная обработка, микротвердость.

Известно, что обработка горных пород с помощью электромагнитных полей приводит к охрупчиванию, а как следствие к облегчению дробления. Магнитно-импульсная обработка (МИО) эффективно применяется для разупрочнения ряда полиминеральных пород, в т.ч. железистого кварцита [1], снижая последующие энергозатраты на стадии измельчения. Проведенные исследования показывают, что МИО железистых кварцитов позволяет повысить извлечение железа и выход концентрата при одновременном повышении его качества [2].

Поскольку физическая природа процессов, стимулируемых в процессе МИО в минералах до конца не ясна, подбор параметров обработки, эффективной для конкретного вида горных пород остается в высокой степени эмпирическим. Для испытаний в лабораторных условиях используют гранулометрический анализ ситовым методом для разделения и взвешивания фракций разного размера. На пробах железистых кварцитов Михайловского ГОКа была поставлена серия экспериментов [2]. Исходная проба концентрата после первой ста-

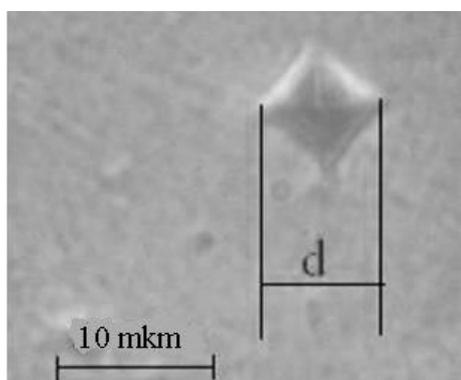
дии измельчения, магнитной сепарации и минералогического анализа была разделена на две равные части, каждая из которых дважды проходила гранулометрический анализ вмокрую путем отсева на плетеных ситах разного класса крупности. Результаты гранулометрического состава исходной руды для примера представлены в табл. 1. Одна часть подвергалась МИО, вторая оставалась контрольной. Последующие действия (доизмельчение, магнитная сепарация, химический анализ) у обеих частей пробы железистого кварцита были одинаковы. Минералогический анализ магнитного продукта показал, что в обработанной пробе доля рудных минералов магнетита на 0.6 %, гематита на 1.6 % больше чем в контрольной; степень раскрытия рудной фазы увеличилась на 1.2 %, нерудной — уменьшилась на 3.6 %.

Описанный метод весьма трудоемок, поэтому актуальным является апробация метода измерения микротвердости для изучения влияния МИО на свойства горных пород. Выбор метода связан с высокой чувствительностью микротвердости как к примесному составу, так и параметрам предварительной

Таблица 1

Гранулометрический состав исходной руды

Классы крупности, мм	Выход фракций, %		
	1-й рассев	2-й рассев	Среднее
-1.0 +0.1	63.8	61.5	62.7
-0.1 +0.074	19.6	19.8	19.7
-0.074 +0.044	9.8	10.9	10.3
-0.044	6.8	7.8	7.3
Исходная	100.0	100.0	100.0

**Рис. 1. Диагональ восстановленного отпечатка магнетита**

обработки постоянным магнитным полем искусственных кристаллов. Известно, что выдержка в магнитном поле значительно изменяет микротвердость немагнитных щелочно-галлоидных, полупроводниковых и молекулярных кристаллов (см., например, [3] и ссылки). В связи с этим, в настоящей работе проверялось влияние одного из режимов МИО на микротвердость агрегатов полиминерального железистого кварцита.

Методика измерений образцов и обработка результатов

Образцами являлись шлифы железистого кварцита Михайловского ГОКа, хранившиеся после приготовления длительное время. Измерение микротвердости проводилось по методу Виккерса с помощью специальной насадки на микроскопе Neophot-21.

Сущность метода заключается во вдавливании с заданной силой в испытуемый материал правильной четырёхгранной алмазной пирамиды, угол между противоположными гранями 136° . Измеряемый параметр — диагональ восстановленного отпечатка (рис. 1). Усреднение проводили по измерению 20–100 отпечатков, микротвердость рассчитывали по стандартной формуле для пирамиды Виккерса H [ГПа] = $18.54 P/d^2$ [4], где P [гс] — сила с которой вдавливали в испытуемый образец, в нашем случае $P = 0.706$ Н (70.6 гс), d [мкм] — средняя по выборке длина диагонали.

Статистика значений микротвердости набиралась по трем полиминеральным образцам (размер зерна ~40 мкм), на каждом из которых делали одновременно по 20 измерений микротвердости магнетита, гематита, кварца. Для проверки повторяемости результатов микротвердость исходных образцов измеряли в разные дни. Полная выборка по всем трем образцам включала, таким образом, более 100 измерений для каждого из агрегатов. Статистическая ошибка по выборке из 20 значений составляет 3–5 %.

Магнитно-импульсная обработка была выполнена в НП «ЦИГТ» на установке ГАН 5000 (рис. 2) [5]. Установка представляет собой отрезок диэлектрического трубопровода, на котором размещена система электро-

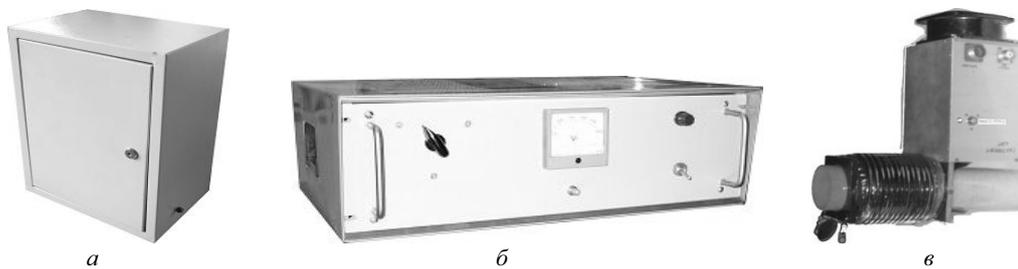


Рис. 2. Лабораторная установка ГАН 5000: а — блок управления; б — генератор низкочастотных импульсов; в — индуктор

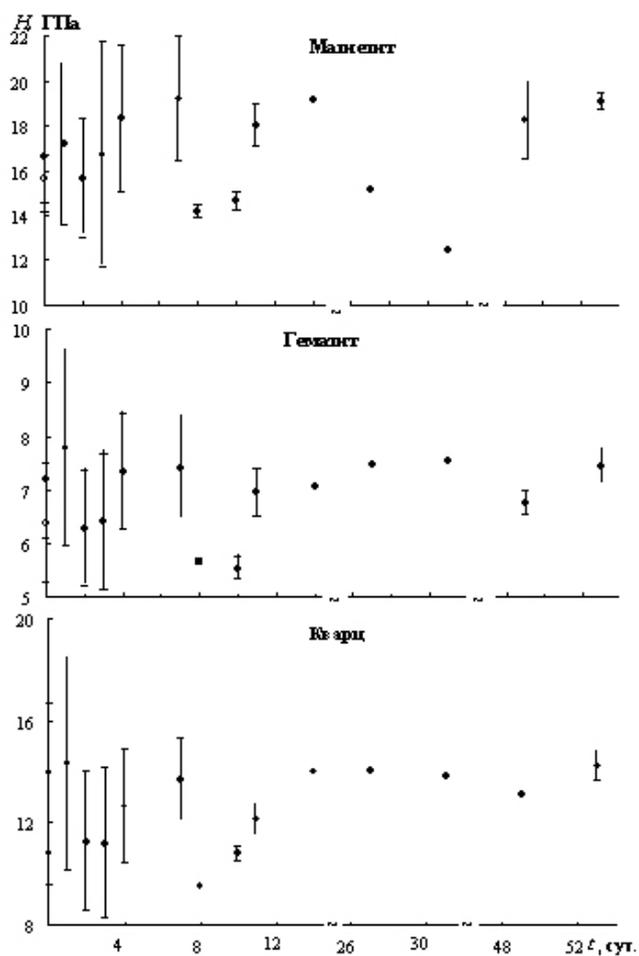


Рис. 3. Средние по трем образцам значения микротвердости железистого кварцита до (светлые точки) и после (темные точки) МИО в зависимости от времени, прошедшего после МИО

магнитных катушек (индуктор). Генератор подаёт на соответствующие обмотки серию управляемых импульсов, что обеспечивает внутри катушки переменное электромагнитное поле. В настоящей работе мы использовали только низкочастотные поля.

Результаты экспериментов и обсуждение

Исходную микротвердость получали, усредняя средние по выборкам значения микротвердости разных образцов. В качестве ошибки рассчитывали стандартное отклонение такого среднего, что для исходной микротвердости составило около 10 % (погрешности светлых точек на рис. 3). Столь большая ошибка измерений обусловлена в первую очередь неоднородностью материала разных зерен одного агрегата. Их небольшой размер вынуждает набирать статистику, делая измерения на разных зернах, состав и ориентация которых могут отличаться.

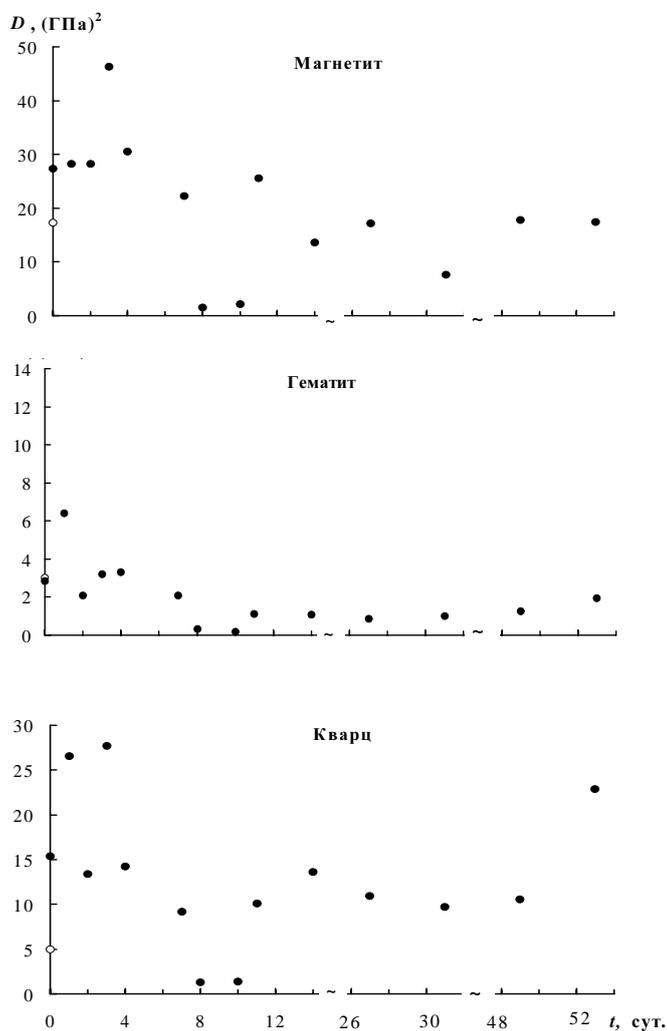


Рис. 4. Дисперсия распределения микротвердости до (светлые точки) и после МИО (темные точки) в зависимости от времени, прошедшего после обработки железистого кварцита

После нескольких серий измерений исходной микротвердости образцы помещались в центральную область индуктора ближе к обмотке. На обмотку подавались три последовательных одиночных импульса с интервалом 0.15 с. Амплитуда магнитного поля, создаваемого при этом внутри катушки ~ 0.1 Тл, длительность им-

пульса 0.28 мс. После МИО микротвердость измерялась в зависимости от времени, прошедшего после обработки, на каждом из трех образцов сериями по 20 измерений. Усреднение проводили как по значениям, полученным на каждом из образцов, так и по всем трем по схеме, описанной выше. Средние значения микротвердости серии из 20 измерений после МИО значительно отличались как для разных образцов, так и на одном образце в течение суток. Диапазон изменений микротвердости в течение первых трех суток после обработки составлял от -20 % до 52 % от исходного значения, что значительно превышало разброс микротвердости до МИО. Со временем разброс несколько уменьшился, но близким к исходному стал лишь спустя длительное время.

Вышесказанное иллюстрирует рис. 3, где темными кружками представлен результат усреднения значений микротвердости по разным сериям измерений, сделанных на трех образцах за каждые из дней, прошедших с момента МИО. Так же показана ошибка, демонстрирующая разброс от образца к образцу в пределах суток. Исходя из значений, показанных на графиках, можно увидеть изменения значений микротвердости и увеличение ошибки, максимум которых

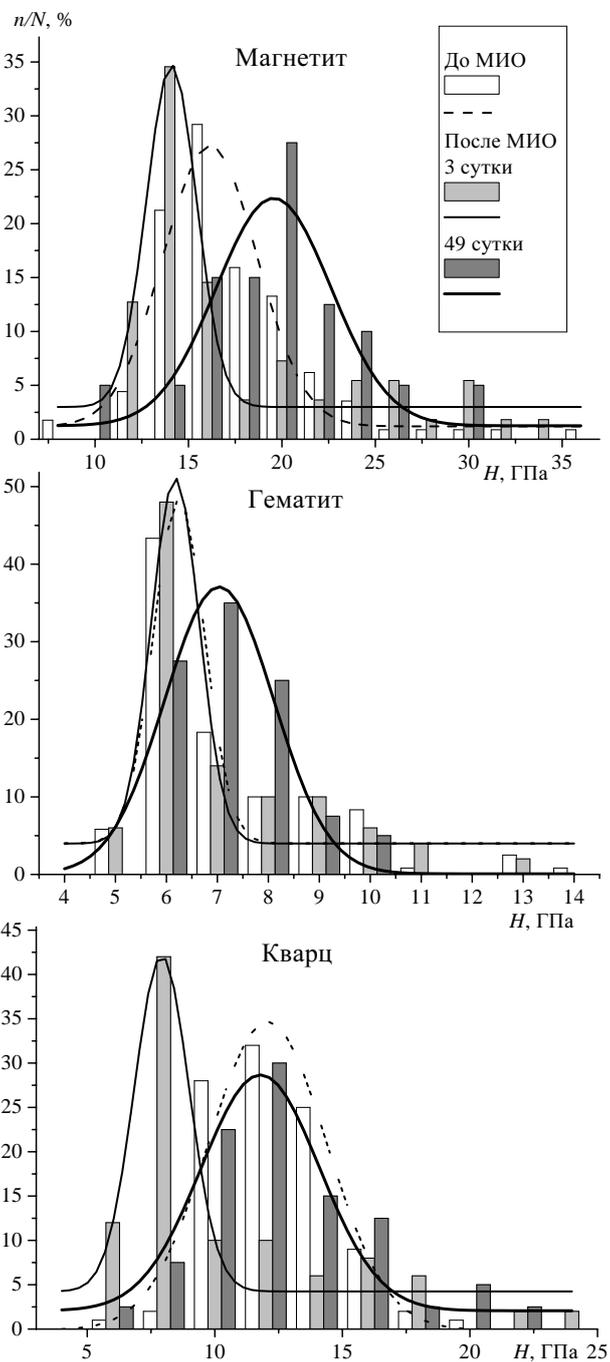


Рис. 5. Гистограммы значений микротвердости агрегатов железистого кварцита до и на 3-и и 49-е сутки после МИО

наблюдается через сутки после МИО у гематита и кварца, а у магнетита на 3-и сутки. Спустя 30—50 суток происходит снижение разброса значений микротвердости. При таком большом разбросе средних значений микротвердости сложно выявить закономерности ее изменения в результате МИО.

Кроме того, нами были проведены наблюдения за статистическими параметрами, характеризующими разброс микротвердости — дисперсией распределения и полным интервалом значений, в зависимости от времени, прошедшего после МИО. Интервал значений практически не менялся, а дисперсия в результате МИО выросла почти в два раза, что можно видеть на рис. 4 в зависимости от времени после обработки. Значения дисперсии сразу после МИО (темные точки) сильно отличаются от исходного (светлые точки) для магнетита и кварца, у гематита изменения почти незаметны.

Для получения дополнительной информации об изменениях микротвердости после МИО железистого кварцита был проведен качественный анализ гистограмм распределения значений H . Рис. 5 иллюстрирует различия их формы до и после МИО для магнетита, гематита и кварца. На рис. 5 представлены исходные гистограммы (белый

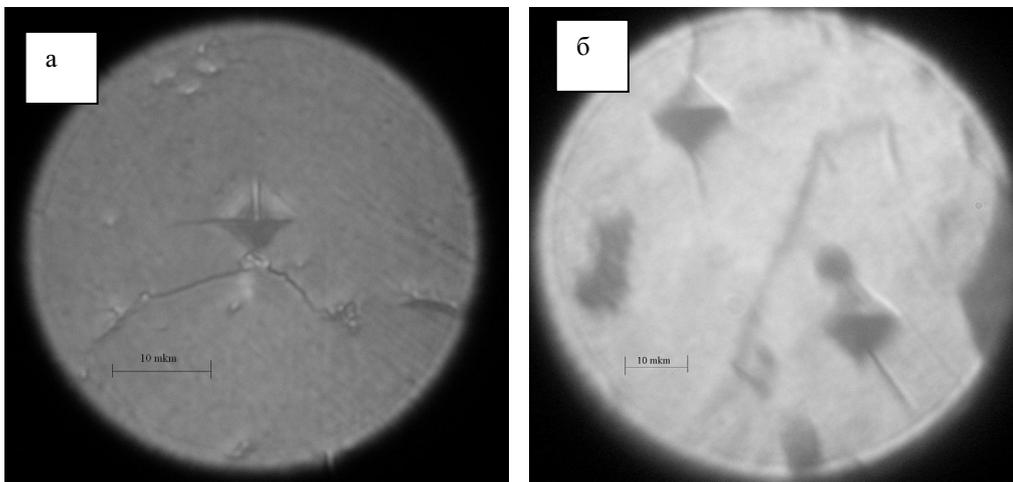


Рис. 6. Характерные трещины, возникающие при идентировании после МИО в агрегатах железистого кварцита: магнетит(а); кварц (б)

цвет) в сравнении с гистограммами на 3-и (светло-серый цвет) и 49-е сутки (темно-серый цвет) после МИО и аппроксимирующие их кривые. Построение и расчеты кривых выполнены в пакете программ для числового анализа данных ORIGIN 6.0.

Гистограммы, построенные на выборке около 100 значений микротвердости каждая, аппроксимируются функцией Гаусса для нормального распределения с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.92-0.99$. На гистограммах кварца видно, что распределение микротвердости на 49-е сутки после МИО совпадает с исходным распределением, а форма гистограммы на 3-и сутки после МИО значительно отличается от них. Для гистограмм значений микротвердости магнетита и гематита наблюдается обратная картина, а именно, совпадение распределений микротвердости до и на 3-и сутки после МИО и несовпадение с распределением микротвердости на 49-е сутки. Возможно, процессы, инициируемые импульсами магнитного поля в железосодержащих агрегатах, развиваются медленно, а

состояние материала после МИО не возвращается к исходному. В кварце же после обработки происходят более быстрые и обратимые изменения состояния.

В процессе измерений микротвердости после МИО было обнаружено, что с течением времени образование отпечатков сопровождается возникновением трещин. Особенно заметно образование трещин при идентировании проявлялось у кварца спустя трое суток после МИО (рис. 6), в гораздо меньшей степени в зернах магнетита, в зернах гематита трещины практически не наблюдались. Трещинообразование при идентировании в кварце после МИО тоже отличает его поведение от поведения железосодержащих агрегатов.

Попытка применить для изучения горных пород методы, испытанные на искусственных «идеальных» монокристаллах, показала, что есть ряд трудностей, возможно непреодолимых. Из-за сильной неоднородности состава и ориентаций отдельных зерен сравнение средних значений микротвердости до и после МИО оказалось весьма не-

информативным. Однако изучение статистических параметров измерений и визуальное наблюдение трещинообразования в процессе индентирования позволяет сделать выводы о качественных изменениях агрегатов железистого кварцита в результате МИО.

Перспективным представляется анализ гистограмм значений микротвердости, развитие которого в дальнейшем, возможно, позволит изучить кинетику состояния разных агрегатов железистого кварцита после МИО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Бруев В.П. и др. ГИАБ, 2004. — № 1. — С. 12—17.
2. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Дашко С.А. и др. Горный журнал, 2002. — № 3. — С. 21.
3. Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Lopatin D.V., et al. Phys.Stat.Sol (a). 1997. V. 160. — P. 3.
4. Петржик Е.А., Даринская Е.В., Демьянец Л.Н. ФТТ. 2008. — Т. 50. — С. 614.
5. Колдаева М.В., Турская Т.Н., Даринская Е.В. Кристаллография, 2005. — Т. 50. — С. 312.
6. Боярская Ю.С. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость. Кишнев: Штиинца, 1972. — 235 с.
7. Евразийский патент № 003853, МПК В02С19/18 Способ разупрочнения материалов кристаллической структуры и устройство для его осуществления. Ананьев П.П., Гончаров С.А., Бельченко Е.Л. и др. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Луняков В.А. — студент, e-mail: cigt@mail.ru; Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
 Колдаева М.В. — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИК РАН, e-mail: mkoldaeva@ns.crys.ras.ru;
 Ананьев П.П. — кандидат технических наук, генеральный директор НП «ЦИГТ», e-mail: cigt@mail.ru.



ДИССЕРТАЦИИ ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ПЕТУШКЕЕВ Борис Львович	Решение трехмерной задачи газовой динамики и переноса метана в угольной шахте с использованием параллельных вычислений	01.02.05	к.ф-м.н.