© В.И. Болобов, В.С. Бочков, С.А. Чупин, С.Ю. Степанов, 2016

УДК 622.02

В.И. Болобов, В.С. Бочков, С.А. Чупин, С.Ю. Степанов

К ВЛИЯНИЮ КРЕПОСТИ ПОРОДЫ НА ЕЕ АБРАЗИВНЫЕ СВОЙСТВА

На примере трех видов апатито-нефелиновые руды, различающейся соотношением составляющих ее минералов и, как следствие, физико-механическими свойствами, рассмотрено влияние крепости на абразивные свойства породы. Изложена методика испытаний и представлены экспериментальные данные о скорости износа об указанные виды руды цилиндрических образцов из стали 110Г13Л, как из материала, наиболее часто использующегося при изготовлении быстро изнашивающихся элементов горного оборудования. Показано, что при существенной разнице в крепости (f = 0,5; 5; 10 по шкале М.М. Протодьяконова) анализируемые виды руды обладают практически одинаковой абразивной способностью по отношению к испытанной стали. Из сопоставления результатов эксперимента и петрографического анализа использованных образцов руды сделан вывод, что влияние разницы в твердости минералов на абразивную способность среды нивелируется особенностями структуры породы.

Ключевые слова: апатит, нефелин, руда, крепость породы, сталь 110Г13Л, абразивная способность, скорость износа.

Введение

Широко распространено мнение, что крепость является одним из основных свойств, определяющим абразивность породы, т.е. способность разрушать контактирующие с породой твердые тела. Разделяя такую точку зрения, например, автор [1] заключает, что качественная связь между показателями абразивности и крепости описывается монотонно возрастающей кривой (пунктирная кривая на рис. 1). Хотя, как отмечает тот же автор, на абразивной способности породы, несомненно, сказываются и другие факторы – наличие более твердых, чем основная масса, минеральных включений (их количество, форма, размеры), особенности строения материала и пр.

Вместе с тем автор [2], экспериментальные данные которого анализируются в работе [1], не выделяет крепость в качестве основного свойства, определяющего способность породы изнаши-

вать другие тела, и заключает, что ни одна из характеристик породы не определяет однозначно степень ее абразивности.

В этой связи представлял научный и практический интерес, на примере какого-либо наиболее часто применяемого конструкционного материала горно-обогатительного оборудования сравнить абразивные свойства пород, состоящих примерно из одних и тех же породообразующих минералов, но существенно различающихся по крепости.

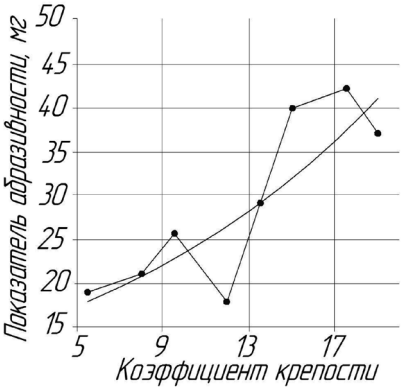

Рис. 1. Зависимость показателя абразивности от коэффициента крепости пород по Протодьяконову: ломаная линия – график, построенный в работе [2]; пунктир – предполагаемый характер зависимости по мнению [1]

В качестве таких абразивных пород использовали три вида нефелин-апатитовой руды Хибинского месторождения с различным соотношением составляющих ее минералов, что обеспечивало различие в механических свойствах породы.

Состав и структуру каждого вида руды определяли петрографическим анализом в проходящем свете с использованием поляризационного микроскопа Leica DM750p. Крепость *f* по

Состав и физико-механические свойства анализируемых видов апатито-нефелиновой руды

№ породы	Состав руды, %	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Крепость по М.М. Протодьяконову	Твердость по Шору
1	апатит 35–40, нефелин 35–40, пироксен 10–15, титанит + циркон до 5	104	10	92–117
2	апатит ~70, нефелин ~20, пироксен ~15, титанит + + амфибол до 5	47	5	67–76
3	апатит 90–100, нефелин до 7, пироксен + титанит + + амфибол до 3	5	0,5	50–55
Примечание: твердость минералов по шкале Мооса: апатита – 5; титанита – 5,5; пироксена – 6; амфибола 6–6,5; нефелина – 6–7 [4]				

М.М. Протодьяконову выражали через предел прочности породы на сжатие ($f = \sigma_{сж}/10$), значение которого определяли экспериментально на механическом прессе ZDM 25/91 с максимальным усилием до 250 кН. Динамическую твердость по Шору устанавливали по методике в модификации Л.А. Шрейнера [3]. Результаты петрографического анализа и физико-механических испытаний представлены в таблице.

Как видно из представленных в таблице результатов, первый вид руды на 70–80% состоит из апатита и нефелина, входящих в породу в примерно равном соотношении. Он же обладает наивысшей крепостью ($f = 10$) и динамической твердостью по Шору (92–117). Третий вид – представляет собой практически чистый апатит. Крепость ($f = 0,5$) и твердость (50–55) у данного вида руды минимальны. У второго вида руды, в структуре которой наряду с апатитом присутствует значительное количество нефелина и других минералов, величины крепости ($f = 5$) и твердости (67–76) занимают промежуточное положение между первой и второй породами.

Методика эксперимента

Испытания металлических образцов на эрозионный износ проводились по методике, близкой к методике Л.И. Барона – А.В. Кузнецова [2], разработанной для классификации горных пород по абразивности, имеющей по сравнению с [2] следующие отличия:

- образцы изготавливались из стали 110Г13Л, как основного материала быстроизнашивающихся элементов горного оборудования (футеровок шаровых мельниц, бил и щек дробилок, зубьев ковшей экскаваторов и др.), после закалки с 1100 °С в воде, что обеспечивало исходную твердость стали ~200 НВ;
- в экспериментах использовались сравнительно низкие нагрузки на образец (50 Н вместо 150 Н по [2]), что позволяло проводить сравнительные испытания по различным, в том числе и отличающимся низкой крепостью, породам;
- испытания проводились на образцах диаметром $D = 8$ мм с глухим отверстием $d = 4$ мм, изготовленных из одной цилиндрической отливки стали;
- в процессе эксперимента периодически фиксировалась убыль массы металла, что позволяло изучать кинетику процесса изнашивания.

Испытания проводились с помощью устройства, собранного на основе вертикального сверлильного станка (рис. 2).

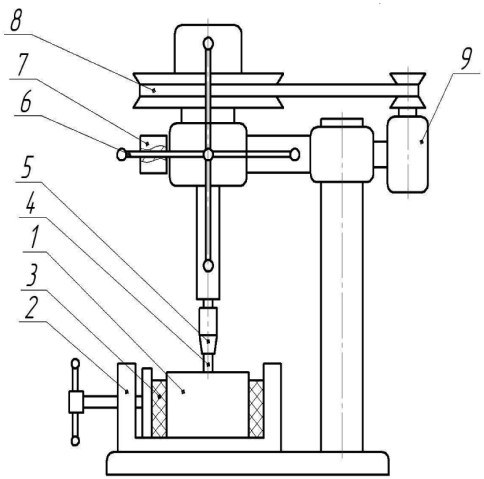

Рис. 2. Принципиальная схема устройства для истирания металлических материалов о горные породы: 1 – пластина абразива, 2 – зажимное устройство, 3 – фиксирующие прокладки, 4 – образец испытуемого материала, 5 – патрон для крепления образца, 6 – рукоять подачи шпинделя станка, 7 – груз фиксированной массы, 8 – клиноременная передача, 9 – электродвигатель

На рукояти *6* подачи шпинделя станка крепили груз *7*, который обеспечивал постоянное прижатие образца к поверхности пластины руды с заданным усилием. Перед началом испытаний с использованием напольных весов установку тарировали по усилию прижатия *P*, как функции от местоположения груза на рукояти подачи шпинделя станка. Испытания проводили по следующей схеме.

Пластину абразива *1*, вырезанную из монолитного куска данного вида руды, с помощью прокладок *3* закрепляли в зажимном устройстве *2*. В патроне *5* шпинделя станка закрепляли предварительно взвешенный на аналитических весах (точность взвешивания 0,1 мг) образец стали и прижимали с постоянным усилием *P* к поверхности рудной пластины. Включали электродвигатель *9* и в течение времени *t* проводили истирание образца об поверхность абразива. По окончанию испытаний образец очищали от продуктов разрушения, повторно взвешивали и определяли убыль массы Δm.

При выбранной нагрузке (P = 50 Н) и продолжительности (1–2 мин) на одном и том же образце проводили серию из 5–7 испытаний. Перед каждым испытанием пластину руды

сдвигали, что обеспечивало контакт образца с поверхностью абразива в новом месте. По результатам серии испытаний 2-х образцов строили график зависимости суммарной убыли массы образца ($\sum\Delta m$) от продолжительности испытаний t. Полученную экспериментальную зависимость аппроксимировали линией, тангенс угла наклона которой принимали за скорость износа испытуемого образца о данную породу, характеризующую абразивные свойства породы.

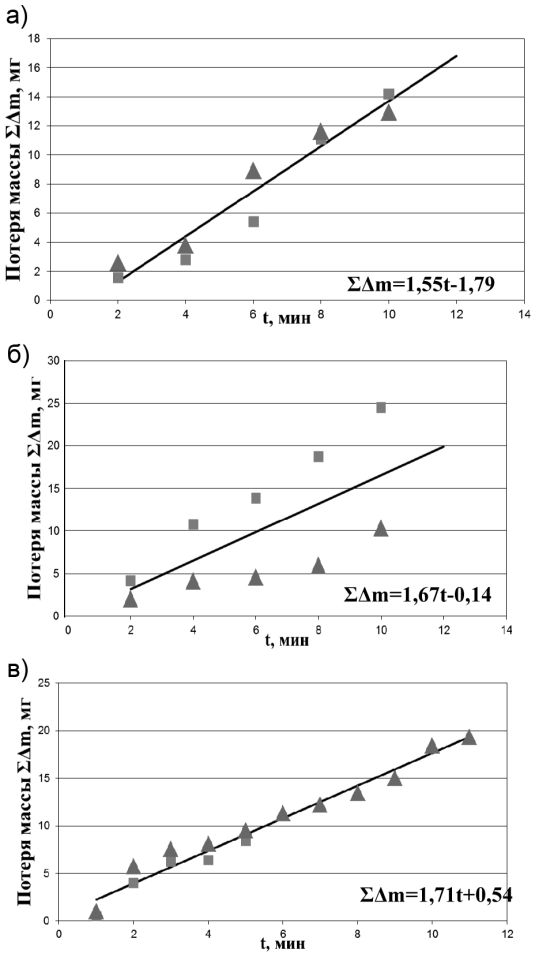

Рис. 3. Изменение убыли массы стальных образцов 1 (■) и 2 (▲) во времени в результате абразивного воздействия нефелино-апатитовой руды вида 1 (а), 2 (б), 3(в)

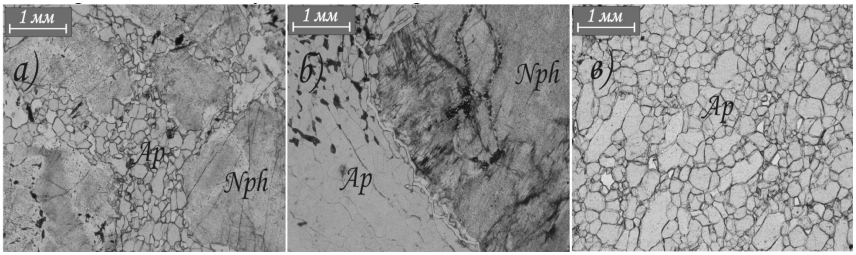

Рис. 4. Микроструктура образцов различных видов апатитовой руды: № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)

Результаты и обсуждение экспериментальных данных

Результаты эрозионных испытаний представлены на рис. 3.

Как видно из представленных данных (рис. 3), экспериментальные зависимости на каждом графике с достаточной точностью могут быть аппроксимированы прямыми вида $\sum\Delta m = K\,t + b$, коэффициенты пропорциональности K которых для всех 3-х прямых практически совпадают: 1,55; 1,67 и 1,71 мг/мин. Это свидетельствует об одинаковой скорости разрушения всех испытанных образцов и, тем самым, о близкой абразивной способности 3-х анализируемых пород. При этом обращает на себя внимание большой разброс в значениях Δm, полученных для износа образцов по 2-ой породе.

Установленные закономерности могут иметь следующее объяснение.

В соответствии с приложением к таблице все основные минералы, составляющие анализируемые породы, имеют различную твердость, как по Моосу, так и по Шору, минимальная из которых у апатита, максимальная – у нефелина. Как можно заключить из сопоставления результатов эксперимента и петрографического анализа, влияние указанной разницы в твердости минералов на абразивную способность среды нивелируется особенностями структуры породы.

Так руда вида 1 представляет собой крупные (~1500 мкм) с неровными гранями зерна таблитчатого нефелина (*Nph* на рис. 4, *а*), отделенные друг от друга сравнительно тонкими прослойками мелкозернистого (~300 мкм) апатита (*Ap*) с вкраплениями пироксена (*Cpx*). Можно предположить, что при достижении крупного, твердого, имеющего неправильную форму нефелинового зерна распространяющаяся по апатиту трещина разрушения для своего дальнейшего распространения должна разрушить это зерно. Для этого необходимы большие энергети-

ческие затраты, что и обеспечивает высокую крепость породы. В то же время при истирании металлического образца о такую породу зерна минералов высвобождаются медленно, поверхность контакта зашлифовывается, что уменьшает скорость износа металла.

Во второй руде зерна нефелина находятся в виде отдельных скоплений, распределенных в апатитовой массе. Толщина слоя апатита между скоплениями гораздо больше, чем расстояние между зернами нефелина в первой руде, что облегчает распространение трещины разрушения по границам зерен апатита и снижает крепость породы. Большой разброс по величине Δm в экспериментальных данных может быть объяснен крайне неоднородным распределением в этой руде составляющих ее минералов. При трении образца по участку породы с преобладанием апатита потеря массы металла меньше, а с преобладанием нефелина – больше.

Руда три, как состоящая практически только из мелких (~800 мкм) правильной формы зерен апатита (*Ap* на рис. 4, *в*), легко разрушается по границам минеральных индивидов и, как следствие, имеет невысокую крепость. По этой причине при трении стального образца об эту породу обнажаются все новые и новые зерна апатита с шероховатой поверхностью, что способствует увеличению скорости истирания металла.

Таким образом, установленная в экспериментах практически одинаковая абразивная способность всех трех анализируемых видов руды, существенно различающихся по крепости, может найти объяснение в различиях их структуры. Эти же данные позволяют заключить, что крепость не является свойством, однозначно определяющим абразивность горных пород.

Необходимо отметить, что близкая абразивная способность всех видов испытанной руды совсем не означает, что при прохождении горным инструментом одной и той же длины выработки в каждой породе он износится на одну и ту же величину, поскольку время, затраченное на это прохождение, будет различным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тененбаум М. М.* Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 320 с.

2. *Барон Л. И.* и *Кузнецов А. В.* Абразивность горных пород при добывании. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 168 с.

3. *Шрейнер Л. А.* Твердость хрупких тел. – М.: Изд-во АН СССР, 1949.
4. *Бетехтин А. Г.* Курс минералогии. – М.: Изд-во КДУ, 2007. – 461 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Болобов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: Boloboff@mail.ru,
Бочков Владимир Сергеевич – аспирант, e-mail: vovabochkov@spmi.ru,
Чупин Станислав Александрович – аспирант, e-mail: Staseg-88@mail.ru,
Степанов Сергей Юрьевич – студент, e-mail: Stepanov-1@yandex.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 622.02

V.I. Bolobov, V.S. Bochkov, S.A. Chupin, S.Yu. Stepanov

BY THE INFLUENCE OF ROCK FORTRESS AT ITS ABRASIVE PROPERTIES

Influence fortress of three kinds of apatite-nepheline ores with different ratios of the constituent minerals (with different physical and mechanical properties) on the abrasive properties are reviewed in the article. Method of testing is described and experimental data on the wear rate of the specified types of cylindrical samples of 110G13L steel as a material commonly used in the manufacture of rapidly wearing items of mining equipment are presented. Analyzed types of ore with significant difference in the fortress (f = 0,5; 5, 10 scale of M.M. Protodjakonov) have almost the same abrasive ability with respect to the tested steel is shown in the article. From a comparison of experimental results and petrographic analysis of ore samples used concluded that the effect of the difference in hardness minerals abrasive capacity depends on the structural features of the breed.

Key words: apatite, nepheline, fortress rock, steel 110G13L, wear rate, abrasiveness of rocks.

AUTHORS

Bolobov V.I.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Boloboff@mail.ru,
Bochkov V.S.[1], Graduate Student, e-mail: vovabochkov@spmi.ru,
Chupin S.A.[1], Graduate Student, e-mail: Staseg-88@mail.ru,
Stepanov S.Yu.[1], Student, e-mail: Stepanov-1@yandex.ru,
[1] National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: rectorat@spmi.ru.

REFERENCES

1. Tenenbaum M. M. *Iznosostoykost' konstruktsionnykh materialov i detaley mashin pri abrazivnom iznashivanii* (Wear resistance of structural materials and machine parts in abrasive wear), Moscow, Mashinostroenie, 1966, 320 p.
2. Baron L. I. i Kuznetsov A. V. *Abrazivnost' gornykh porod pri dobyvanii* (Abrasiveness of rocks at procuring), Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961, 168 p.
3. Shreyner L. A. *Tverdost' khrupkikh tel* (The hardness of brittle solids), Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1949.
4. Betekhtin A. G. *Kurs mineralogii* (Rates mineralogy), Moscow, Izd-vo KDU, 2007, 461 p.