

**ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
MINERAL PROCESSING**

Научная статья

УДК 622.023.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-140-148

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА КРЕПОСТЬ
МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД****Новиков Юрий Витальевич,* Власова Вера Викторовна,
Барахтенко Вячеслав Валерьевич, Бурдонов Александр Евгеньевич**

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*для корреспонденции: 89500505553r@gmail.com

**Информация о статье**

Поступила:

27 июля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2024 г.

Опубликована:

05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:*Коэффициент крепости, магматические породы, азот, климатические камеры, минералогия, СЭМ.***Аннотация.**

Изучение влияния температурных условий на крепость магматических пород представляет собой важную задачу в контексте разработки эффективных технологий их переработки. Магматические породы, такие как порфирит, долерит и габбро-долерит, широко встречаются в горнодобывающей промышленности. В северных регионах, где температуры могут варьироваться от высоких до крайне низких, изменение физико-механических свойств пород под воздействием температурных колебаний может существенно повлиять на их поведение в процессе переработки. Эти изменения могут привести к увеличению износа оборудования и снижению производительности технологических процессов. В данной работе проведены лабораторные испытания, направленные на исследование влияния температур в диапазоне от +200, +20, -5, -20, -196°C на прочностные характеристики перечисленных пород. Применен метод определения коэффициента крепости по М. М. Протодьяконову, а также выполнен анализ гранулометрического состава разрушенного материала. Установлено, что изменение температурного режима влияет на гранулометрические характеристики, что имеет важное значение для процесса дробления и измельчения пород. Выявлено, что при температуре -5°C крепость пород возрастает до 51,04% для порфирита и до 102,86% для габбро-долерита. Полученные результаты подчеркивают необходимость учета температурных факторов при проектировании оборудования и выборе технологий переработки горных пород, чтобы повысить эффективность и надежность производственных процессов в условиях различных температурных режимов.

Для цитирования: Новиков Ю.В., Власова В.В., Барахтенко В.В., Бурдонов А.Е. Исследование влияния температур на крепость магматических пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 140-148. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-140-148, EDN: OLLEZY

Введение

Известно, что магматические и метаморфические породы по объему составляют от 90 до 95% верхней части земной коры (до 16 км) [1] и являются естественными минеральными агрегатами, возникновение которых происходит при кристаллизации или застывании эндогенных расплавов. Данные

породы обладают жесткими кристаллизационными связями между минеральными зёрнами, что обуславливает их высокую прочность. Подробное изучение характеристик магматических пород проводилось в работах [2, 3].

На сегодняшний день данные породы применяются во многих сферах народного

хозяйства: в качестве калийных удобрений [4], в сельском хозяйстве [5], в качестве кислотоупорных изделий [6], в цементной промышленности [7] и в строительной отрасли [8].

Кроме этого, магматические породы являются вмещающими для большинства руд, содержащих черные, цветные, благородные металлы и прочие полезные компоненты, перерабатываемые в горно-обогатительной индустрии [9-10]. В качестве примера можно подчеркнуть, что около 90% скандия в земной коре содержится именно в магматических породах [11].

Необходимо отметить, что большое количество таких месторождений расположено в районе северных территорий, где влияние низких температур на процессы рудоподготовки, в частности дробления, весьма значительно. Температура, которую, как правило, не учитывают при разработке технологии и подборе оборудования для разрушения руды, может привести к снижению технико-экономических показателей цехов рудоподготовки в частности и работы горно-обогатительного предприятия в целом. Данный момент объясняется тем, что горные породы при отрицательных температурах меняют свои физико-механические свойства, что приводит к повышенному износу разрушающего оборудования и повышению расхода электроэнергии [12]. Исходя из этого, умение управлять свойствами горных пород, оказывая на них различного рода воздействия, является крайне важной задачей в плане создания современных технологий переработки полезных ископаемых.

Вопросы, связанные с влиянием отрицательных температур, достаточно подробно описаны с точки зрения поведения горных пород в массиве, однако информации, связанной с поведением породы при изменении температуры на стадии дробления и измельчения, не так много, что и определяет актуальность проведенных исследований.

Основное внимание исследователей в данной области сосредоточено в направлении изучения влияния знакопеременных температур на разупрочнение горных пород. К примеру, в работе изучен процесс циклического нагрева и замораживания руды [13] и его влияния на трещинообразование [13-15].

Нами изучались [16] циклы заморозки-нагрева горных пород, имитирующие смену времен года, и после 160 повторных циклов определяли предел прочности при одноосном сжатии.

Известно, что температурное воздействие на материал, в том числе на горную породу, является простым и управляемым процессом. Однако под действием как положительных, так и

отрицательных температур происходит множество изменений, которые влияют на прочностные характеристики пород, что обуславливает сложность установления четких зависимостей, которые впоследствии могли бы позволить прогнозировать принцип их разрушения при механическом воздействии.

В связи с этим целью данной работы является исследование влияния разницы температур на определенные физико-механические свойства магматических пород и анализ процессов, происходящих в гетерогенных структурах.

Материалы и методы

В качестве экспериментальных образцов были выбраны представители полнокристаллических мелкозернистых вулканических пород: порфирита, долерита и габбро-долерита.

Изучение текстуры вулканических пород проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51. Инвертируемый системный микроскоп GX51 позволяет проводить исследования в режимах светлого и темного поля. Подготовка образцов осуществлялась с использованием отрезного станка Labotom-5 до размеров 10x10 миллиметров. Подготовка поверхности образцов осуществлялась на полуавтоматическом шлифовально-полировальном станке с микропроцессорным управлением Tegramin-25.

Для определения структуры материала и его внешних дефектов был использован сканирующий электронный микроскоп JEOL модели JVB-4500, оснащенный электронной (LaB6) и ионной пушками, выполняющий функции сканирующего электронного микроскопа, с увеличением x30 (в режиме навигации по образцу) x100 – x300 000.

Определение крепости пород как одного из основных параметров используемого при выборе дробильного оборудования проводили на приборе определения крепости ПОК. Крепость материалов оценивали в соответствии с ГОСТ 21153.1-75 «Метод определения коэффициента крепости по Протодряконову» при различных температурах исследуемого материала (диапазон температур +200, +20, -5, -20, -196°C).

Крепость горной породы рассчитывали по формуле:

$$f = \frac{20 \cdot n}{h}$$

где 20 – эмпирический числовой коэффициент, обеспечивающий получение общепринятых значений коэффициента крепости и учитывающий затраченную на дробление работу;

n – число сбрасываний гири при испытании одной навески;

h – высота столбика мелкой фракции в объемемере после испытания пяти навесок, мм.

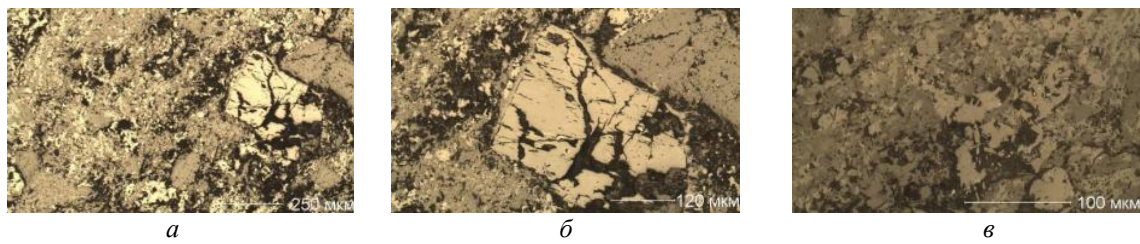


Рис. 1. Снимки поверхности порфирита при различных увеличениях
a – 5х, *б* – 10х, *в* – 20х

Fig. 1. Images of the porphyry surface at various magnifications
a – 5x, *b* – 10x, *c* – 20x

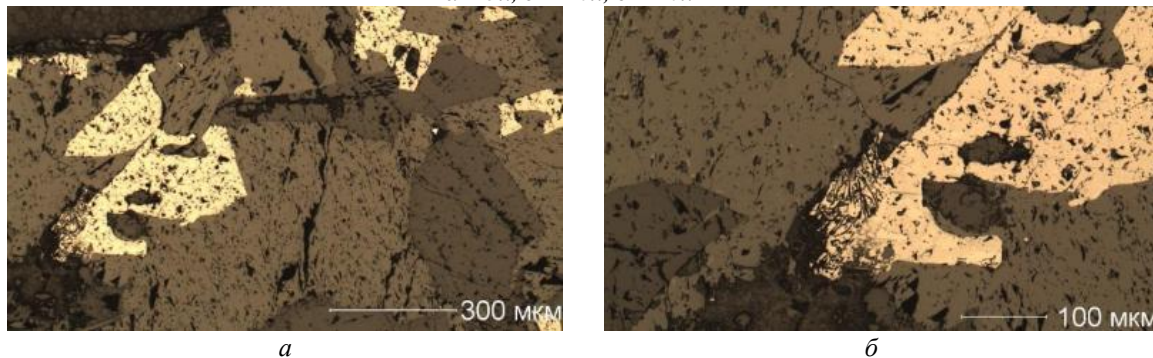


Рис. 2. Снимки поверхности долерита при различных увеличениях
a – 5х, *б* – 10х

Fig. 2. Images of the dolerite surface at various magnifications
a – 5x, *b* – 10x

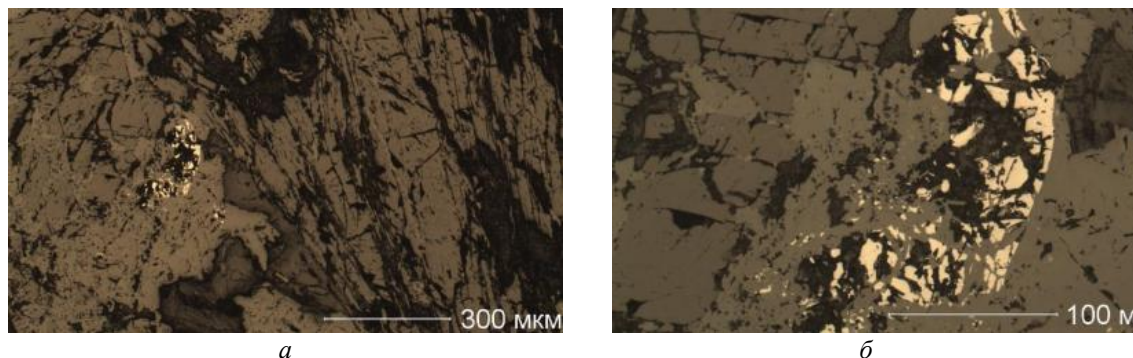


Рис. 3. Снимки поверхности габбро-долерит при различных увеличениях
a – 5х, *б* – 20х

Fig. 3. Images of the gabbro-dolerite surface at various magnifications
a – 5x, *b* – 20x

За окончательный результат испытания принимали среднее арифметическое результатов четырех определений.

Для достижения критерия однофакторного эксперимента количество сбрасываний для каждой породы определялось при комнатной температуре и использовалось для всех температур, определенных исследованием.

Оптические исследования образцов

Результаты исследования исходных образцов на оптическом микроскопе представлены на Рис. 1, 2 и 3.

Порфировые выделения по количеству уступают стеклу; они представлены плагиоклазом, частью оплавленным, частью с

идiomорфными ограничениями. В стекловатой основной массе видны редкие мелкие индивиды тех же минералов и магнетита; текстура ее ясно флюидальная. Структура порфировая с гиалиновой основной массой. На снимке при максимальном увеличении, которое позволяло реально различать структуру материала, видны кристаллы от 25 до 5 микрон.

Исследуемые образцы относятся к долерит-порфировой структуре. На снимках видны зерна светлого плагиоклаза. Порода с нечетко выраженной атакситовой текстурой. Структура среднезернистая. Текстура массивная. Присутствует множество мелких трещин,

исследование которых представляет интерес для дальнейшей работы.

Порода с хорошо различимой долеритовой структурой, подчеркиваемой беспорядочно расположенными зернами белого плагиоклаза в микрокристаллической основной массе, сложенной преимущественно пироксеном и биотитом.

Для более детального изучения образцов был применен сканирующий электронный микроскоп (Рис. 4-6).

Как и было сказано при анализе снимка с оптического микроскопа отчетливо видны крупные кристаллы. При 3000-кратном

увеличении видна пора, пространство вокруг которой имеет множество трещин, а также видны микротрещины толщиной не более 1 мкм.

На Рис. 5а видно присутствие различных по составу кристаллов. Учитывая тот факт, что образец подвергался шлифовке, отчетливо видны трещины. На Рис. 5б видны границы минералов, скол одного кристалла, который, по всей видимости, является менее прочным, что в свою очередь позволило увидеть острую грань другого кристалла.

Поверхность образца габбро-диабазы покрыта большим на первый взгляд количеством трещин, однако при увеличении видно, что это

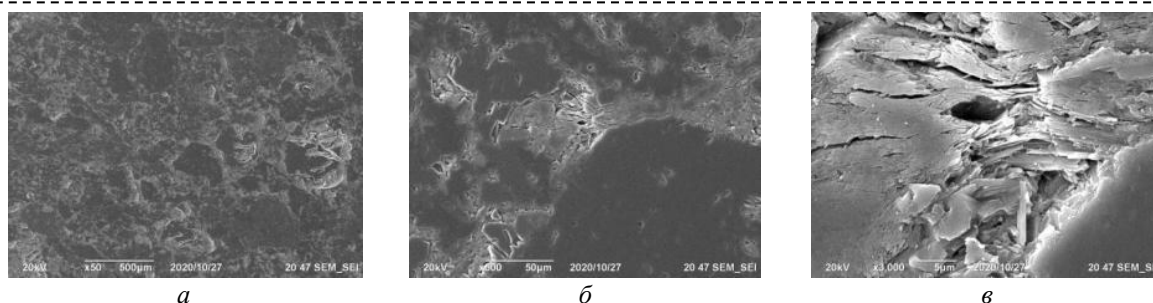


Рис. 4. Снимки поверхности порфиры при различных увеличениях
 а – 50х, б – 500х, в – 3000х
 Fig. 4. Images of the porphyry surface at various magnifications
 а – 50х, б – 500х, в – 3000х

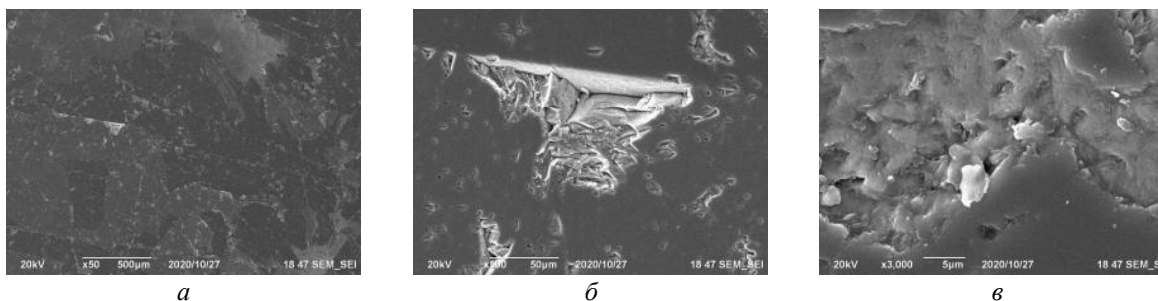


Рис. 5. Снимки поверхности диабазы при различных увеличениях
 а – 50х, б – 500х, в – 3000х
 Fig. 5. Images of the diabase surface at various magnifications
 а – 50х, б – 500х, в – 3000х

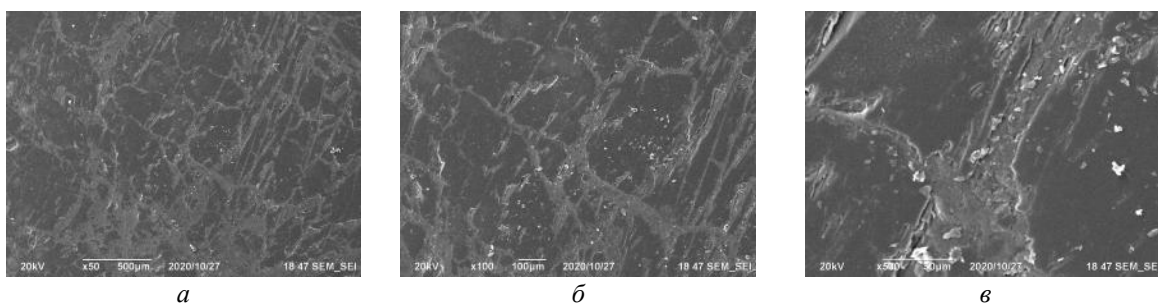


Рис. 6. Снимки поверхности габбро-диабазы при различных увеличениях
 а – 50х, б – 100х, в – 500х
 Fig. 6. Images of the gabbro-diorite surface at various magnifications
 а – 50х, б – 100х, в – 500х

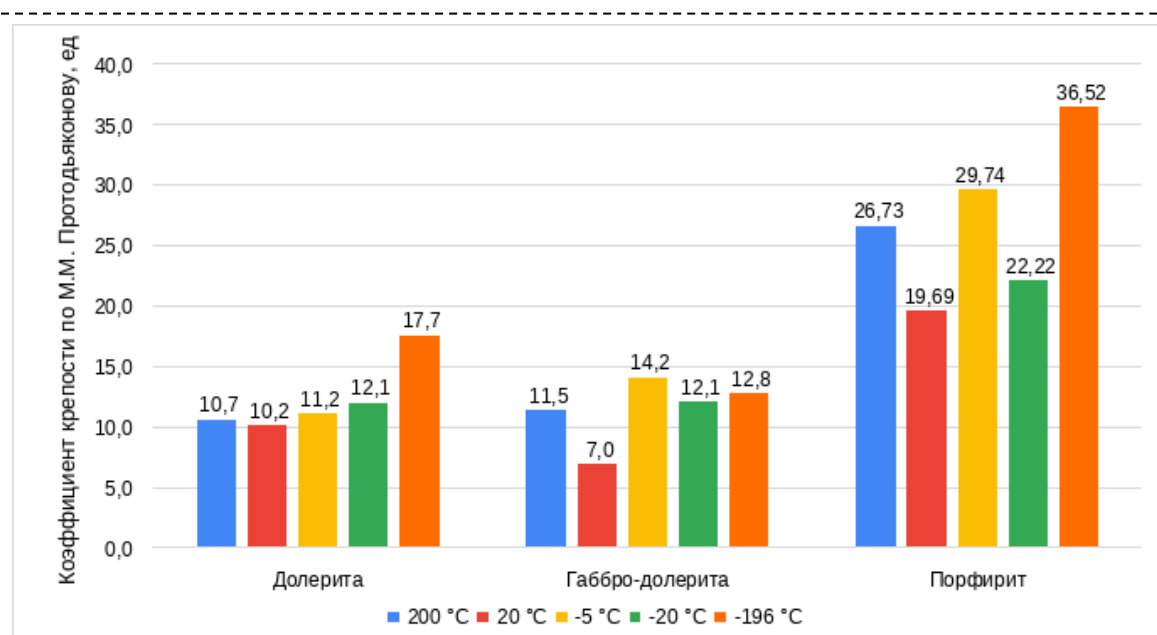


Рис. 7. Результаты определения коэффициента крепости по Протодьяконову при различных температурах

Fig. 7. Results of determining the strength coefficient according to Protodiakonov at different temperatures

цементирующий минерал.

Установлено, что все исследуемые образцы представлены массивной структурой, на каждом образце присутствуют следы постмагматических трещин и изменений. Образец порфирита при изучении на оптическом и электронном микроскопе показал массивность своего строения, которая объясняет высокую плотность и крепость данной породы. На снимках, полученных с помощью СЭМ, отчетливо видно, что присутствует светлый и темный минерал, при этом светлый обладает более низкой прочностью. Вероятнее всего этот факт и является причиной, по которой долерит обладает более низкой прочностью по сравнению с порфиритом. Различия долерита и габбро-долерита заключаются в более мелких кристаллах, которые не являются такими явными концентраторами напряжений. Данные образцы не имеют значительных дефектов, что позволит получить наиболее корректные результаты по изучаемым породам.

Определение крепости пород при различных температурах методом М. М. Протодьяконова

Сущность метода заключается в определении коэффициента крепости, который пропорционален отношению работы, затраченной на дробление горной породы, к вновь образованной при дроблении поверхности, оцениваемой суммарным объемом частиц размером - 0,5 мм. Полученные результаты при различных температурах представлены на Рис. 7.

При комнатной температуре было определено необходимое количество сбрасываний для каждой породы, для долерита значение

составило 8, порфирита – 20, габбро-долерита – 15. Результаты определения крепости при комнатной температуре представлены на Рис. 7.

Для определения крепости горных пород при повышенных температурах (+ 200°C) отобранные навески помещали в сушильный шкаф и выдерживали до постоянного веса. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что все образцы увеличили свою крепость при температуре + 200°C.

Известно, что горные породы относятся к необратимым термодинамическим системам, что является следствием неоднородности минерального состава [17]. По этой причине при изменении температуры горных пород до их абсолютных значений в них могут происходить различные процессы, например хрупкое разрушение, разупрочнение, плавление, диссоциации и т. д.

Также считается, что при нагреве горных пород их прочность изменяется в зависимости от упрочнения или разупрочнения минералов и их границ. В [18] приведена гипотеза, что весь процесс нагрева можно разделить на три области, которые определены многочисленными опытами и характеризуются как:

- Первая температурная область – температурная зависимость прочности пород определяется термостойкостью минералов;
- Вторая температурная область – температурная зависимость прочности пород определяется состоянием границ между минералами;
- Третья температурная область – характер изменения прочностных пород определяется изменением прочности минералов.

Следуя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что первая причина увеличения крепости горных пород при повышении температуры связана с тепловым расширением минералов, имеющим по различным кристаллографическим направлениям неодинаковые значения коэффициента линейного теплового расширения. Все это приводит к уменьшению расстояния между плоскостями раздела отдельных минералов и к увеличению их взаимного притяжения.

Вторая причина повышения крепости может заключаться в способе определения данного параметра, так как в породах имеется жидкая часть, которая при повышении температуры выпаривается, что приводит к образованию пор, влияющих на развитие трещин.

В результате проведенных исследований нами установлено, что в сравнении с комнатной температурой крепость испытуемых образцов при температуре -5°C возросла на 9,8% для диабазы, на 51,04% для порфирита и на 102,86% для габбро-долерита, что обуславливается увеличением размеров кусков разрушенной породы в фракции + 0,5 мм.

В ходе дальнейшего исследования определили влияние более низких температур (-20°C) на изменение крепости горных пород.

Установлено, что крепость порфирита снизилась, что может говорить о развитии таких дефектов структуры, как микротрещины, формирование которых связано с уменьшением размеров кристаллов при понижении температур и, как следствие, увеличением скопления дислокаций. Это, вероятнее всего, и определяет образование большего количества класса -0.5 мм по сравнению с опытами, проведенными при комнатной температуре.

При изучении влияния крайне низких температур (-196°C) образцы выдерживались в жидком азоте в течение 5 минут, что вызвало их полное промерзание.

У всех исследуемых образцов вырос коэффициент крепости. Кроме того, зафиксировано изменение гранулометрического состава. Однако в работе [19] говорилось, что продукты разрушения горных пород после испытания образцов на прочность значительно мельче, чем при естественной температуре. Обосновывается это возникновением структурных термических напряжений. Вероятно, причиной обратного результата стало резкое охлаждение образцов, в результате которого крупные зерна минералов за счет уменьшения геометрических размеров на границе взаимодействия образовали более крупные трещины, что и привело к образованию более крупной фракции.

Заключение

Результаты проведенных исследований доказывают значительные изменения физико-технологических характеристик пород магматического происхождения: порфирита, долерита и габбро-долерита при воздействии разнопеременных температур.

Установлено (Рис. 7), что крепость долерита, нагретого до 200°C , увеличилась на 4,9%, при -5°C и -20°C увеличилась на 9,8% и 18,63% соответственно, при охлаждении азотом крепость выросла на 73,53%.

Крепость порфирита, нагретого до 200°C , увеличилась на 35,75%, при -5°C и -20°C увеличилась на 51,04% и 12,5% соответственно, при охлаждении азотом крепость выросла на 85,7% (Рис. 7).

Крепость габбро-долерита, нагретого до 200°C , увеличилась на 64,29%, при -5°C и -20°C увеличилась на 102,86% и 72,86% соответственно, при охлаждении азотом крепость выросла на 82,86% (Рис. 7).

Все вышеперечисленное свидетельствует о необходимости корректировки методики подбора оборудования на стадии проектирования схемы рудоподготовки ввиду изменения крепости горных пород под влиянием температур.

Следует предположить, что изменения характеристик сырья при разных температурах могут быть причиной некорректной работы оборудования (изменение гранулометрических характеристик на выходе), что в свою очередь влияет на последующие стадии обогащения и технико-экономические показатели работы фабрики в целом.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение свойств горных пород в более узком, строго очерченном диапазоне температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang H., Liu Y., Song W. Igneous genesis of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: New petrographical and structural evidence from the H1-H9 cross-section and deep-drilling exploration // *Ore Geology Reviews*. 2021. № 138. P. 104397.
2. Trotta R. P., Barroso E. V., da Motta L. M. G. Migmatitic gneiss aggregates: Compositional, mechanical, and morphological responses to innate heterogeneity // *Engineering Geology*. 2021. № 283.
3. Nakashima S., Isono Y., Kimura T., Kawakami K., Saeki T. Visible and near infrared spectroscopy of rocks for rock strength evaluation // *ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium*. ARMS 2014. Pp. 354-364.
4. Da Motta Junior R. L., Mattiello E. M., Matias P. C., Ballotin F. C., de Lima G. E. S., Pedroti L. G. Analysis of Potential Applications of Kamafugite Rocks in Fertilizer // *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021. Pp. 233-240.

5. Ramos C. G., Querol X., Oliveira M. L. S., Pires K., Kautzmann R. M. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer // *Science of the Total Environment*. 2015. № 512–513. Pp. 371–380.
6. Danchenko Y., Andronov V., Sopov V., Khmyrov I., Khrypynskyy A. Acid-basic surface properties of clay disperse fillers // *MATEC Web of Conferences*. 2018. № 230. 03004.
7. Al-Fatlawy R. A., Al-Baghdadi W., Jabal Q. A. Mechanical properties of gabbro aggregate concrete // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. № 9(10). Pp. 176–181.
8. Liu Y., Huang Y., Sun W., Nair H., Lane D. S., Wang L. Effect of coarse aggregate morphology on the mechanical properties of stone matrix asphalt // *Construction and Building Materials*. 2017. № 152. Pp. 48–56.
9. Li W., Liu X.-M., Wang K., Koefoed P. Lithium and potassium isotope fractionation during silicate rock dissolution: An experimental approach // *Chemical Geology*. 2021. № 568.
10. Wei B., Wang C. Y., Wang Z., Cheng H., Xia X., Tan W. Mantle-derived gold scavenged by bismuth-(tellurium)-rich melts: Evidence from the mesozoic wulong gold deposit in the north china craton // *Ore Geology Reviews*. 2021. № 131.
11. Wang Z., Li M. Y. H., Liu Z.-R. R., Zhou M.-F. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration // *Ore Geology Reviews*. 2021. № 128.
12. Burdonov A. E., Fedotov P. K., Novikov Y. V., Kuzmin M. P., Rasskazova A. V. Influence of temperature on the strength of alumina-containing raw materials // *Metalurgija*, 2021. № 60(3-4). Pp. 415–418.
13. Yu L., Peng H.-W., Zhang Y., Li G.-W. Mechanical test of granite with multiple water-thermal cycles // *Geothermal Energy*. 2021. № 9(1).
14. Fu J., Zhu W., Luo X., Li Y., Zhou H., Zhang D. Study on failure process of fractured rock by using a new material containing three-dimensional internal fracture surfaces // *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2014. №45(9). Pp. 57–63.
15. Yang H., Zhang J.-X., Shan R.-L., Wu F.-M., Guo Z.-M. Experimental study on mechanical properties of frozen saturated single fractured rock mass // *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2018. 39(4). Pp. 45–55.
16. Yang C., Zhou K., Xiong X., Deng H., Pan Z. Experimental investigation on rock mechanical properties and infrared radiation characteristics with freeze-thaw cycle treatment. *Cold Regions Science and Technology*. 2021. № 183.
17. Дмитриев А. П., Гончаров С. А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М.: Недра, 1978.
18. Базарова Т. Ю., Бакуменко И. Т., Костюк В. П. [и др.] Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов. Новосибирск: Наука, 1975.
19. Yao Z., Mungall J. E., Jenkins M. C. The Rustenburg Layered Suite formed as a stack of mush with transient magma chambers // *Nature Communications*. 2021. № 12(1). 505.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии *Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Новиков Юрий Витальевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: 89500505553r@gmail.com

Власова Вера Викторовна, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: vlaver@istu.edu

Барахтенко Вячеслав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: Antivso@yandex.ru

Бурдонов Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: slimbul@inbox.ru

Заявленный вклад авторов:

Новиков Юрий Витальевич – проведение исследования и экспериментов, сбор и анализ данных по статье,

Власова Вера Викторовна – формулировка и развитие ключевых целей и задач исследования, подготовка

и редактирование текста;

Барактенко Вячеслав Валерьевич – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы

Бурдонов Александр Евгеньевич – утверждение окончательного варианта статьи;

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE STRENGTH OF IGNEOUS ROCKS

Novikov Yuri V.*, Vlasova Vera V., Barakhtenko Vyacheslav V., Alexander E. Burdonov

Irkutsk State Technical University

*for correspondence: 89500505553r@gmail.com



Article info

Received:

27 July 2024

Accepted for publication:

22 November 2024

Accepted:

02 December 2024

Published:

05 December 2024

Keywords: Strength coefficient, igneous rocks, nitrogen, climatic chambers, mineralogy, SEM.

Abstract.

Studying the impact of temperature conditions on the strength of igneous rocks is a crucial task in developing effective technologies for their processing. Igneous rocks, such as porphyry, dolerite, and gabbro-dolerite, are commonly found in mining operations. In northern regions, where temperatures range from high to extreme, fluctuations in temperature can significantly alter the physical and mechanical properties of these rocks, affecting their behavior during processing. Such changes can lead to increased equipment wear and decreased productivity of technological processes. To investigate this phenomenon, laboratory tests were conducted to examine the effect of temperatures ranging from +20°C to -196°C on the strength properties of the aforementioned rocks. The M.M. Protodianokov method was used to determine the strength coefficient, and the granulometric composition of the fractured material was analyzed. It has been determined that changes in temperature have an effect on the granulometric properties, which is significant for the process of rock crushing and grinding. It was found that at a temperature of -5°C, the strength of the rock increases by 51.04% for porphyrite and 102.86% for gabbradolerite. The findings emphasize the need to consider temperature factors when designing equipment and selecting rock processing techniques in order to improve the efficiency and reliability of manufacturing processes under various temperature conditions.

For citation: Novikov Yu.V., Vlasova V.V., Barakhtenko V.V., Burdonov A.E. Investigation of the influence of temperature on the strength of igneous rocks. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):140-148. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-140-148, EDN: OLLEZY

REFERENCES

1. Tan. L.Yu., Song U. The mathematical genesis of the origin of REE–Nb–Fe in the Bath–Obo: new graphical and structural data obtained in the H1–H9 section and during deep drilling. *Reviews of ore Geology*. 2021; 138:104397.
2. Trotta R.P., Barroso E.V., da Motta L.M. Aggregates of migmatite gneisses: compositional, mechanical and morphological reactions to innate heterogeneity. *Engineering geology*. 2021; 283.
3. Nakashima S., Isono Yu., Kimura T., Kawakami K., Saeki T. Spectroscopy of rocks in the visible and near infrared ranges to assess the strength of rocks.

International Symposium INP - 8th Asian Symposium on Rock Mechanics. 2014. Pp. 354–364.

4. da Motta Junior R.L., Mattiello E.M., Mathias P.K., Ballotin F.K., de Lima G.E., Pedroti L.G., Analysis of potential applications of camafugite rocks as fertilizers. *The series "Minerals, metals and materials"*. 2021. 233–40.

5. Ramos K.G., Kerol H., Oliveira Jr., Pires K., Kautzman R.M. Preliminary assessment of volcanic rock powder for use in agriculture as a soil remineralizer. *Environmental science in general*. 2015; 512-513:371–380.

6. Danchenko Yu., Andronov V., Sopov V., Khmyrov I., Khryapinsky A. Acid-basic properties of the surface of clay dispersed fillers. *Web-conferences of Mats*. 2018; 230:03004.
7. Al-Fatlawi R.A., Al-Baghdadi U., Jabal K.A. Mechanical properties of gabbro-concretes. *International Journal of Civil Engineering and Technologies*. 2018; 9(10):176–181.
8. Liu Yi, Huang Yi, Song Wu, Nair X, Lane D.S., Wang L. Influence of coarse aggregate morphology on mechanical properties of asphalt concrete with a stone matrix. *Construction and building materials*. 2017; 152:48–56.
9. Li U., Liu X-M., Wang K., Kofoed P. Fractionation of lithium and potassium isotopes during dissolution of silicate rocks: an experimental approach. *Chemical Geology*. 2021; 568.
10. Wei B., Wang SAI, Wang Z., Cheng H., Xia H., Tan U. Gold of mantle origin extracted from melts rich in bismuth (tellurium): data from the Mesozoic Woolong gold deposit in the North China craton. *Reviews of ore geology*. 2021; 131.
11. Wang Z., Li Muh, Liu Z.-R.R., Zhou M.-F. Scandium: ore deposits, the key role of magmatic enrichment and future research. *Reviews of ore geology*. 2021; 128.
12. Burdonov A.E., Fedotov P.K., Novikov Yu.V., ...Kuzmin M.P., Rasskazova A.V. The effect of temperature on the strength of alumina-containing raw materials. *Metallurgy*. 2021; 60(3–4):415–418.
13. Yu L., Peng H.-V., Zhang I., Li G.-V. Mechanical tests of granite at multiple water–thermal cycles. *Geothermal energy*. 2021; 9(1).
- Fu J., Zhu V., Luo H., Li I., Zhou H., Zhang D. Investigation of the fracture process of fractured rock using a new material containing three-dimensional internal fracture surfaces // Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue ban). *Journal of the Central Southern University (Science and Technology)*. 2014; 45(9):57–63.
15. Yang H., Zhang J.-H., Shan R.-L., Wu F.-M., Guo Z.-M. An experimental study of the mechanical properties of a frozen saturated single fractured rock mass. *Yantu Lixue/Mechanics of rocks and soils*. 2018; 39(4):45–55.
16. Yang S., Zhou K., Xiong H., Deng H., Pan Z. Experimental study of the mechanical properties of rocks and the characteristics of infrared radiation during processing in the freeze-thaw cycle. *Science and technology of cold regions*. 2021; 183.
17. Dmitriev A.P., Goncharov S.A. Thermal and combined destruction of rocks. M.: Nedra; 1978.
18. Bazarova T.Yu., Bakumenko I.T., Kostyuk V.P., etc. Magmatogenic crystallization according to the study of melt inclusions. Novosibirsk: Nauka; 1975. Ya.Z., Mangall J.H., Jenkins M.K. The famous socialite Rustenburg, striving to obtain information using various computer technologies by foci. *Nature Communications*. 2021; 12(1):505.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Yuri V. Novikov, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 664074, Irkutsk, 83 Lermontov str., e-mail: 89500505553r@gmail.com

Vera V. Vlasova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 664074, Irkutsk, 83 Lermontov str., e-mail: vlaver@istu.edu

Vyacheslav V. Barakhtenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 664074, Irkutsk, 83 Lermontov str., e-mail: Antivsyoy@yandex.ru

Alexander E. Burdonov, Ph.D., Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 664074, Irkutsk, 83 Lermontov str., e-mail: slimbul@inbox.ru

Contribution of the authors:

Yuri V. Novikov – conducting research and experiments, collecting and analyzing data on the article,

Vera V. Vlasova – formulation and development of key research goals and objectives, preparation and editing of the text;

Vyacheslav V. Barakhtenko – setting a research task; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of research; writing text, data collection and analysis; conclusions

Alexander E. Burdonov – approval of the final version of the article.

All authors have read and approved the final manuscript.

