

УДК 622.023

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ
НА ДРОБЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Р. Бисаи¹, С. Гоуэл¹, А. Хатвал¹, С. К. Пал¹,
А. Махумдер¹, Т. К. Нанди²**

¹*Кафедра горного дела, Email: rohan.bisai1@gmail.com,
Индийский институт технологии, г. Харагпур, WB-721302, Индия*
²*Центр криогенной инженерии, Индийский институт технологии,
г. Харагпур, WB-721302, Индия*

Представлены экспериментальные данные о разрушении гранита и песчаника с использованием криогенной предварительной обработки. Образцы погружали в жидкий азот на различные по продолжительности отрезки времени. Изучена также комбинированная предварительная обработка с помощью нагрева печи и с последующим охлаждением в жидком азоте. Установлено, что криогенная обработка ведет к уменьшению предельной прочности на растяжение гранита более чем на 40 %, тогда как предельная прочность на сжатие сокращается на 28 %. Для песчаника наблюдалось снижение предельной прочности на сжатие на 33 %.

Предварительная криогенная обработка, измельчение, гранит и песчаник

DOI: 10.15372/FTPRPI20180204

В процессе разрушения горной породы значительная часть подводимой энергии используется для ее дробления и измельчения. В настоящее время средняя эффективность расходования энергии в процессе измельчения составляет менее 5 %. Это приводит к поиску новых решений вопросов повышения энергоэффективности измельчения породы и общих технико-экономических показателей в данной отрасли

Методы предварительной обработки горных пород исследуются во всем мире. К ним относятся микроволновый нагрев [1–4], дробление импульсами высокого напряжения [5–8], дробление ультразвуком [9], термическое дробление, тепловой удар и т. д. [10–17]. Эффективность микроволнового нагрева зависит от минералов, входящих в состав породы. Например, силикаты, карбонаты, сульфаты и некоторые оксиды ведут себя как изоляторы, в то время как сульфиды, арсениды и сульфосоли действуют как диэлектрики. Жильные минералы, такие как кварц, кальцит и полевошпат, прозрачны для микроволн.

Многие исследования показали, что нагрев является эффективным методом обработки, предшествующим измельчению [10–12]. Так, в [13] установлено, что при нагревании 80 % оловянной руды класс измельчения уменьшился с 27.2 до 22.3 мм. Нагрев угля также приводил к увеличению количества более мелких частиц (<13 мкм) [14]. В [15] наблюдалось снижение прочности на сжатие при нагревании сланца. Системные исследования по нагреву гранита и

песчаника до температуры 800°C были проведены в [16]. Гранит снижал предельную прочность на сжатие с повышением температуры, в то время как песчаник демонстрировал резкое падение предельной прочности при нагревании выше 800°C. В [17] сделан вывод, что гранит должен быть нагрет выше 600°C для снижения предельной прочности на сжатие до 50 %.

Сообщается о нескольких экспериментальных исследованиях влияния электрического, механического и термического воздействия на разрушение гранита, песчаника, калькаренита и т. д. [18]. Большинство из них посвящены нагреву образца до 800°C, за которым следует воздушное охлаждение или охлаждение водой. В [12] выявлено снижение предельной прочности на сжатие калькаренита (пористой породы) на 50 % при нагревании до 600°C и охлаждении в воде. Обнаружено также, что модуль Юнга уменьшился на 78 % [5, 12].

Средством, вызывающим термические напряжения в горных породах, является нагревание образцов до высокой температуры и охлаждение в воде. В [19] изучена способность криогенных жидкостей для создания сильного температурного градиента, генерирующего локальное напряжение при растяжении в породах, окружающих скважину. Использование жидкого азота в качестве жидкости для разрыва в скважинах применяется на практике с 1994 г. [20]. Эксперименты с жидким азотом в качестве закалочной среды приведены в [21]. Как сообщалось, железные руды и фосфориды становятся довольно хрупкими, что способствует улучшению измельчения и эффективного разделения. Таким образом сера отделялась от карбоната кальция. В [22] отмечалась экономия энергии, равная 47 %, при проведении испытаний на охлажденном красноцветном кварците после его нахождения в жидком азоте в течение 40 мин.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, посвященных определению характеристик разрушения гранита и песчаника в результате предварительной обработки в жидком азоте. Также исследовалось влияние комбинированной предварительной обработки образцов с нагревом в печи и затем охлаждением в жидком азоте. Характеристики измельчения получены при нормальной температуре в универсальной испытательной машине измерением предельной прочности на растяжение и сжатие.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ

Влияние предварительной обработки горных пород изучалось на образцах гранита и песчаника путем измерений предельной прочности на растяжение и предельной прочности на сжатие. Применялись следующие типы предварительной обработки образцов:

- погружение в жидкий азот (LIND): образцы опускали в жидкий азот при температуре 196°C на 15, 30, 45 и 60 мин, затем нагревали до комнатной температуры на открытом воздухе;
- нагрев в печи и охлаждение жидким азотом (LINQ): образцы нагревали до 110°C в течение 4 ч и охлаждали в жидком азоте в течение 15, 30, 45 и 60 мин.

Подробная информация об образцах и методах их предварительной обработки приведена в табл. 1–4. Таким образом было подготовлено 72 образца.

Установлено, что поведение пород при использовании криогенной предварительной обработки значительно различалось для разных образцов. В [23] наблюдался широкий диапазон (17.5–107.7 МПа) значений предела прочности на сжатие в образцах песчаника. На степень разрушения горных пород влияют элементный состав, влажность и т. д. В [25] отмечено аномальное поведение упругих констант песчаника при температуре между 40 и 200 К. В настоящей работе для определения химического состава образцов использовали энергодисперсионный рентгеновский анализ с детектором ZEISS EDS. На рис. 1 показан элементный состав и их процентное содержание в образцах гранита и песчаника соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Информация об образцах гранита для измерения предельной прочности на растяжение

Номер образца	Размер, мм <i>D/L</i>	Предварительная обработка, мин	Предельная прочность на растяжение, МПа
GT 1	55.1/29	Нет	12.30
GTL 1	55.0/29	LIND, 15	9.42
GTL 2	55.0/29	LIND, 30	9.58
GTL 3	55.0/29	LIND, 45	9.86
GTL 4	55.0/28	LIND, 60	7.10
GTO 1	55.0/28	LIND, 15	10.20
GTO 2	55.0/28	LIND, 30	9.17
GTO 3	55.0/28	LIND, 45	8.82
GTO 4	55.0/28.2	LIND, 60	6.90
GT 2	55.1/29	Нет	12.90
GTL 5	55.1/29	LIND, 15	9.28
GTL 6	55.0/28	LIND, 30	8.33
GTL 7	55.1/29	LIND, 45	8.79
GTL 8	55.1/28	LIND, 60	6.97
GTO 5	55.0/29	LIND, 15	9.72
GTO 6	55.1/29	LIND, 30	8.86
GTO 7	55.0/29	LIND, 45	8.91
GTO 8	55.1/29	LIND, 60	7.33

ТАБЛИЦА 2. Информация об образцах гранита для измерения предельной прочности на сжатие

Номер образца	Размер, мм <i>D/L</i>	Предварительная обработка, мин	Предельная прочность на сжатие, МПа
GC 1	55.1/115	Нет	187.87
GCL 1	55.0/124	LIND, 15	195.90
GCL 4	55.0/115	LIND, 60	144.83
GC 2	55.1/115	Нет	182.16
GCL 5	55.1/124	LIND, 15	205.31
GCL 6	55.0/126	LIND, 30	172.71
GCL 7	55.0/121	LIND, 45	155.22
GCL 8	55.0/115	LIND, 60	146.34
GCO 1	55.1/121	LIND, 15	176.26
GCO 2	55.1/117	LIND, 30	170.54
GCO 3	55.1/130	LIND, 45	158.32
GCO 4	55.0/121	LIND, 60	130.45
GCO 5	55.1/140.1	LIND, 15	180.43
GCO 6	55.1/130.3	LIND, 30	177.31
GCO 7	55.1/130.3	LIND, 45	164.46
GCO 8	55.0/130	LIND, 60	138.88
GCL 2	55.0/128	LIND, 30	169.11

ТАБЛИЦА 3. Информация об образцах песчаника для измерения предельной прочности на растяжение

Номер образца	Размер, мм <i>D/L</i>	Предварительная обработка, мин	Предельная прочность на растяжение, МПа
ST 1	54/28	Нет	1.94
STL 1	54/28	LIND, 15	2.29
STL 2	54/28.3	LIND, 30	1.93
STL 3	54/29	LIND, 45	1.75
STL 4	54/28.4	LIND, 60	1.39
STO 1	54/28	LINQ, 15	1.86
STL 7	54/28	LIND, 45	1.86
STL 8	54/28	LIND, 60	1.55
STO 5	54/28	LINQ, 15	2.06
STO 6	54/28.2	LINQ, 30	2.01
STO 7	54/27	LINQ, 45	1.99
STO 8	54/27.2	LINQ, 60	1.38
STO 2	54/28	LINQ, 30	1.77
STO 3	54/29	LINQ, 45	1.67
STO 4	54/27	LINQ, 60	1.44
ST 2	54/28	Нет	2.09
STL 5	54/28.2	LIND, 15	2.01
STL 6	54/28	LIND, 30	1.89

ТАБЛИЦА 4. Информация об образцах песчаника для измерения предельной прочности на сжатие

Номер образца	Размер, мм <i>D/L</i>	Предварительная обработка, мин	Предельная прочность на сжатие, МПа
SC 1	54/109	Нет	49.66
SCL 1	54/109	LIND, 15	41.59
SCL 2	54/109	LIND, 30	35.00
SCL 3	54/109	LIND, 45	41.82
SCL 4	54/109	LIND, 60	32.00
SCO 1	54/109	LINQ, 15	51.67
SCO 2	54/109	LINQ, 30	42.77
SCO 3	54/109	LINQ, 45	44.20
SCO 4	54/109	LINQ, 60	39.61
SC 2	54/109	Нет	48.91
SCL 5	54/109	LIND, 15	44.32
SCL 6	54/109	LIND, 30	40.29
SCL 7	54/109	LIND, 45	41.34
SCL 8	54/109	LIND, 60	34.73
SCO 5	54/109	LINQ, 15	49.86
SCO 6	54/109	LINQ, 30	41.35
SCO 7	54/109	LINQ, 45	46.33
SCO 8	54/109	LINQ, 60	38.28

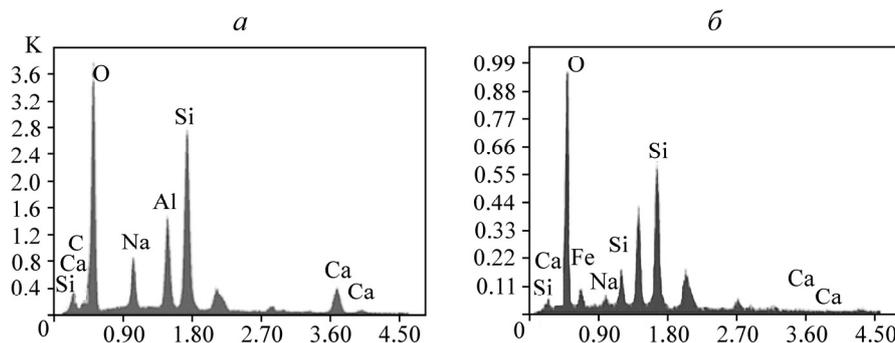


Рис. 1. Энергодисперсионный рентгеновский анализ образцов: *a* — гранита; *б* — песчаника

Измерения включали в себя определение предельной прочности на сжатие (UCS) и на растяжение (UTS) образцов горных пород. Предельная прочность на сжатие — это одноосное сжимающее напряжение, при котором образец разрушается:

$$UCS = \frac{P_{\max}}{\pi D^2 / 4}, \tag{1}$$

где P_{\max} — разрушающая нагрузка; D — диаметр образца. Предельная прочность на растяжение рассчитана с помощью бразильского метода:

$$UTS = \frac{2P'_{\max}}{\pi DL}, \tag{2}$$

P'_{\max} — разрушающая нагрузка; L — осевая длина образца. Для этих измерений использовалась испытательная машина INSTRON, серия SATEC KN.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений предельной прочности на растяжение и на сжатие гранита и песчаника с предварительной криогенной обработкой представлены на рис. 2, 3. Тенденция снижения прочности наблюдалось во всех случаях, однако степень ее снижения зависела от образцов, а также от продолжительности погружения в жидкий азот. Результаты после одного часа погружения или охлаждения жидким азотом рассмотрены в сравнении с другими данными. В каждой точке анализировались показания для двух образцов, из которых выведен средний результат.

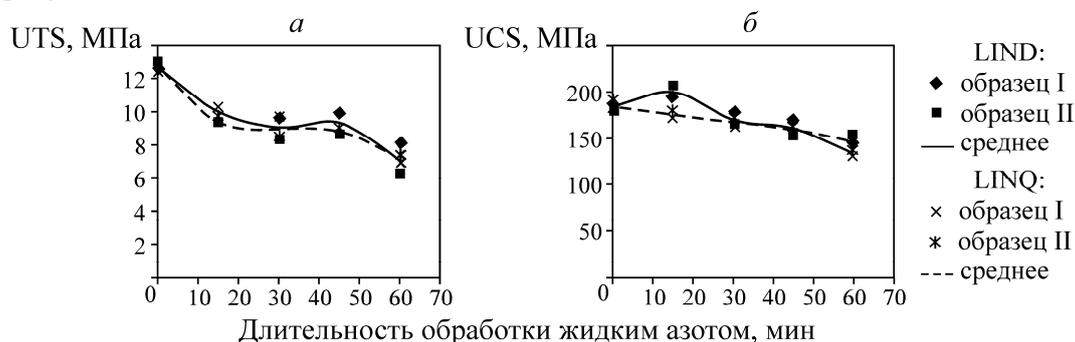


Рис. 2. Предельная прочность гранита с различной предварительной обработкой: *a* — на растяжение (UTS); *б* — на сжатие (UCS)

Гранитный образец при нагревании в печи и охлаждении жидким азотом в течение часа показал около 44.6% снижения предельной прочности на растяжение (см. рис. 2*a*) по сравнению с образцом без предварительной обработки. Тот же материал (гранит) с погружением

в жидкий азот в течение часа (без обработки в печи) продемонстрировал снижение предельной прочности на растяжение, равное 4.16 %. Учитывая стоимость и сложность нагрева в печи и незначительное уменьшение предельной прочности на растяжение, считаем, что предпочтительным вариантом обработки является погружение в жидкий азот.

На рис. 2б показана предельная прочность на сжатие образцов гранита при различных условиях предварительной обработки. Обработка в печи, сопровождаемая охлаждением жидким азотом в течение 1 ч, уменьшает предельную прочность на сжатие на 28 %, тогда как при погружении в азот (без нагрева) снижение составляет примерно 20.5 %. Этот результат с точки зрения сокращения предельной прочности на сжатие гранита может способствовать использованию нагрева до охлаждения жидким азотом.

Песчаники также подвергались погружению в жидкий азот, нагреванию в печи и охлаждению жидким азотом в разные по продолжительности отрезки времени. Результаты приведены на рис. 3. По сравнению с необработанными образцами, предельная прочность на растяжение уменьшается на 27 % при погружении образцов в жидкий азот на 1 ч. При обработке образцов в печи и охлаждении азотом уменьшение предельной прочности на растяжение составляет 30 %.

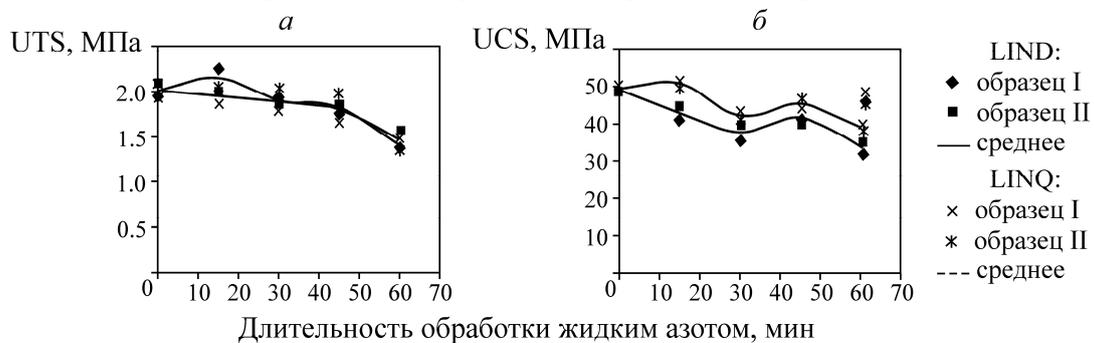


Рис. 3. Предельная прочность песчаника с различной предварительной обработкой: а — на растяжение (UTS); б — на сжатие (UCS)

Исследования показали, что песчаник, нагретый в печи и охлажденный жидкий азотом в течение 1 ч, снижал приблизительно на 21 % предельную прочность на сжатие по сравнению с образцом без предварительной обработки. Тот же материал (песчаник) с погружением в азот только на 1 ч снижал предельную прочность на сжатие на 33 %.

Полученные результаты приведены в табл. 5. Видно, что в образцах гранита при погружении в жидкий азот на 1 ч наблюдается снижение прочности на растяжение на 44 %, в то время как для песчаника — на 27 %. Показано, что предварительный нагрев в печи с последующим охлаждением в азоте не приводит к значительному сокращению предела прочности на растяжение по сравнению с погружением в азот. С точки зрения уменьшения предела прочности на сжатие нагрев и гашение гранита демонстрируют некоторое преимущество перед одним охлаждением, в то время как для песчаника наблюдается обратная картина.

ТАБЛИЦА 5. Снижение предельной прочности на растяжение и на сжатие породы, обработанной жидким азотом, %

Образец	Прочность на			
	растяжение		сжатие	
	Погружение в азот	Охлаждение азотом	Погружение в азот	Охлаждение азотом
Гранит	44.16	44.6	20.5	28
Песчаник	27.40	29.0	33.0	21

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ И БЕЗ НЕЕ

Формирование термических трещин в образцах горных пород после обработки жидким азотом наблюдалось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Полученные результаты могут быть качественно проанализированы с целью обоснования влияния термообработки на структуру породы.

На рис. 4 приведены изображения со сканирующего электронного микроскопа образцов гранита до и после одного часа нахождения в жидком азоте. Для наблюдения распределения минеральных зерен использовали СЭМ с увеличением 2000 раз. Ввиду компактного расположения минеральных зерен в граните с его хорошей межзеренной цементацией необработанный образец гранита (см. рис. 4а) не обнаруживал признаков разрушения. На рис. 4б показано, что межзеренная цементация повреждена, а после обработки жидким азотом между зернами появились микротрещины. Это указывает на то, что тепловое напряжение, возникающее при охлаждении жидким азотом, разрушает межзеренную цементацию и создает новые трещины.

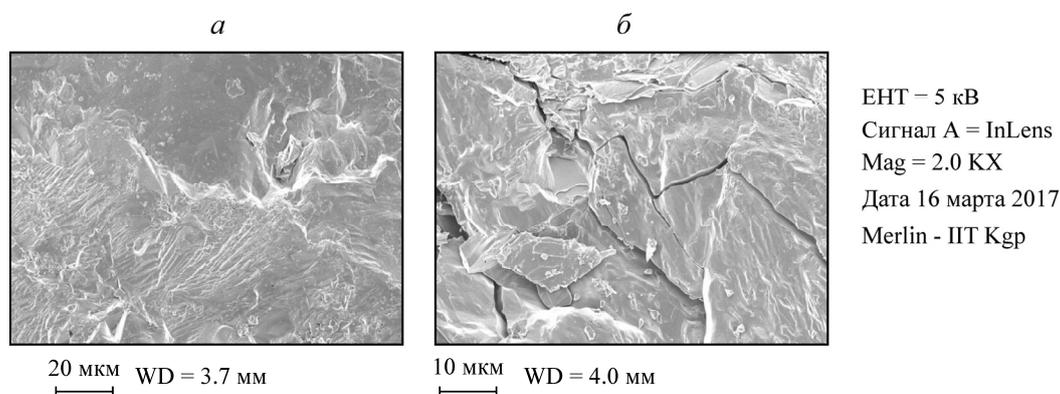


Рис. 4. Изображение образца гранита, полученное на сканирующем электронном микроскопе: *а* — без предварительной обработки; *б* — после погружения в жидкий азот в течение 1 ч

На рис. 5 представлены СЭМ-изображения образцов песчаника без какой-либо обработки и через 1 ч после погружения в жидкий азот. При увеличении в 4000 раз распределение зерен можно наблюдать четко. Как и в случае с образцом гранита, в песчанике формируются значительные повреждения и появляются трещины в пористой структуре. На рис. 5б наблюдаются микротрещины. На рис. 6 показано СЭМ-изображение образцов гранита и песчаника, подверженных нагреву в печи до 110°C, а затем охлажденных в жидком азоте в течение 1 ч.

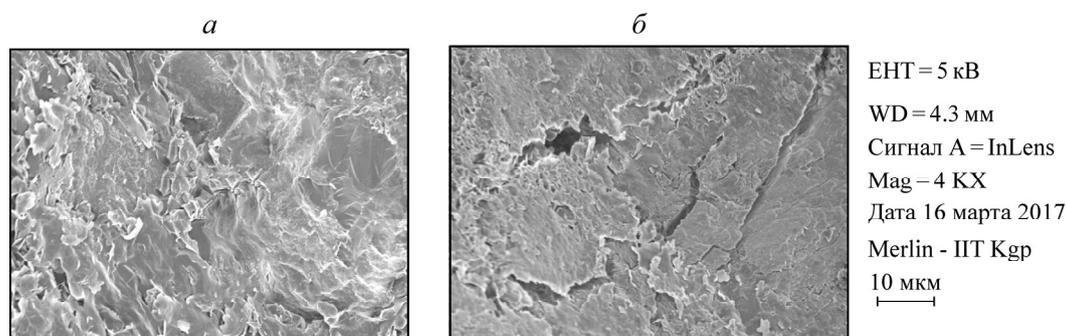


Рис. 5. СЭМ-изображение песчаника: *а* — в начальном состоянии; *б* — после погружения в жидкий азот на 1 ч

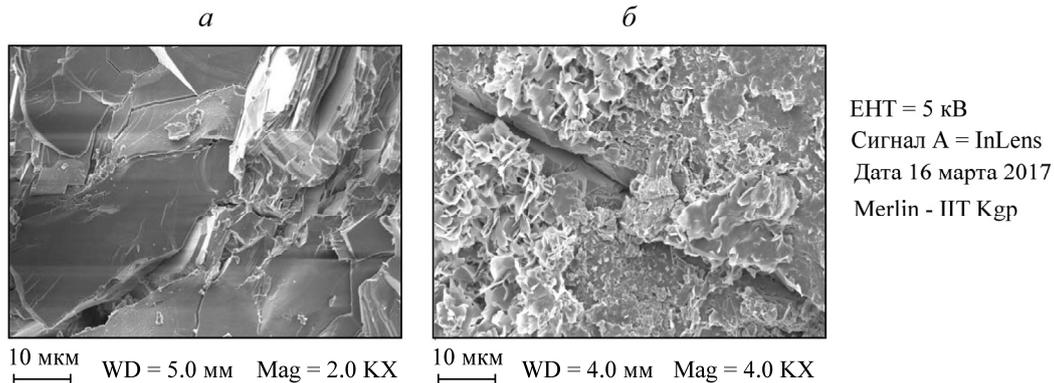


Рис. 6. СЭМ-изображение образца после нагревания в печи и охлаждения в жидком азоте в течение 1 ч: *а* — гранита; *б* — песчаника

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Охлаждение или закалка любого материала в жидкости представляет собой процесс нестационарного теплообмена. Теплообмен в переходном состоянии зависит от температуропроводности пород, которая в целом очень низкая. При 300 К значения температуропроводности составляют от $2.8 \cdot 10^{-5}$ для кварцита до $1.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для известняка [26] по сравнению с $9.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для алюминия при такой же температуре. Таким образом, когда образец горной породы погружен в жидкий азот, перенос тепла изнутри образца в жидкость занимает много времени. Как следствие, температура на внешней поверхности образца быстро падает при погружении в жидкий азот и приближается к температуре жидкости. Это приводит к тому, что большой температурный градиент вызывает развитие теплового напряжения в материале. Там, где тепловое напряжение превышает предел прочности материала, появляются микротрещины.

Из-за созданного теплового напряжения охлаждение в жидком азоте может вызвать несколько других изменений. Они включают в себя изменение микроструктуры породы, образование и расширение микротрещин, увеличение порового масштаба [27]. Охлаждение жидким азотом обычно увеличивает плотность сетки трещин внутри породы. Термический стресс может нарушить межзеренную цементацию и вызвать локальную концентрацию напряжений вблизи ранее существовавших трещин [28]. Изменения характеристик породы зависят от типа породы, обработанной в жидком азоте. Порода, являющаяся пористой средой, изначально имеет большое количество внутренних дефектов и микротрещин, которые также влияют на механическое поведение материала [29]. Возникновение трещины или разрыва при погружении в жидкий азот в породе объясняется также тем, что руды и минералы, составляющие породу, имеют разную теплопроводность и коэффициент расширения. При термическом воздействии эти компоненты проходят процессы различного теплового расширения или сжатия, приводящие к возникновению трещин. Трансформационная пластичность зависит от минералогии, поэтому ее влияние на механическое поведение породы будет варьировать в зависимости от состава минеральных компонентов и их относительного распределения. Такой подход требует рассмотрения геологической истории породы в дополнение к ее физическим свойствам и минеральному составу [30]. Ввиду этого ни одна теория или модель не могут предсказать поведение пород под термическим напряжением с достаточной точностью.

Из рис. 2а следует, что погружение в жидкий азот и охлаждение жидким азотом имеют аналогичное влияние на предельную прочность на растяжение образцов гранита. Небольшие различия возникают из-за температурной обработки образцов при нагревании печи. Основной вклад в уменьшение предельной прочности на растяжение приходится на термическое напряжение или

микротрещины, возникающие при охлаждении жидким азотом. Аналогичные тенденции наблюдаются на рис. 3, за исключением точек с 15-минутной обработкой азотом. Повышение прочности через 15 мин погружения в азот, вероятно, связано со структурной переориентацией молекул без формирования значительных термических трещин. Структурную переориентацию можно обнаружить в металлах при криогенной обработке режущих инструментов [31], что помогает увеличить прочность инструмента. Однако в породах требуется проведение большего количества исследований, поскольку подобное поведение предельной прочности на растяжение гранита (рис. 2а) и предельной прочности на сжатие песчаника (рис. 3б) не наблюдается.

В отличие от данных, представленных на рис. 2, 3, предельная прочность на сжатие песчаника с погружением в жидкий азот показывает значительно более высокое снижение, чем для образцов, подвергнутых охлаждению азотом (см. рис. 3б). Это может быть связано с наличием воды в необработанном песчанике, которая при замораживании способствует формированию микротрещин. В образцах, обработанных в печи, вода испаряется, и обнаруживается меньшее снижение предельной прочности на сжатие. Необходимы дальнейшие подтверждения, поскольку такие результаты не наблюдаются в случае исследований предельной прочности на растяжение.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние криогенной предварительной обработки с использованием жидкого азота для изучения характеристик разрушения образцов гранита и песчаника. В ходе проведения экспериментов получены следующие результаты.

Данные по граниту показывают тенденцию к снижению предельной прочности на сжатие и растяжение при охлаждении жидким азотом. Степень снижения зависит от продолжительности действия азота. Снижение предельной прочности на растяжение в граните составило 44 % после часового погружения в жидкий азот. Предварительный нагрев в печи с последующим погружением в азот не оказал значительного влияния на предельную прочность на растяжение гранита по сравнению с обработкой только азотом.

Комбинация нагрева в печи с одночасовым погружением в азот дала на 8 % большее снижение прочности на сжатие образцов из гранита, чем тех, которые обрабатывались только погружением в азот.

Для песчаника наблюдалось 27–29 % снижение предельной прочности на растяжение при обоих методах предварительной обработки. Что касается предельной прочности на сжатие песчаника, то погружение в жидкий азот оказалось более эффективным по сравнению с охлаждением азотом. Около 33 % снижения прочности на сжатие песчаника наблюдалось при одночасовом погружении в азот.

Преимущество криогенной предварительной обработки горных пород напрямую зависит от элементного состава образцов. Для каждого типа материалов необходимы подробные исследования методов предварительной обработки наряду с другими проблемами, такими как стоимость, сложность, выполнимость и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sikong L. and Bunsin T.** Mechanical property and cutting rate of microwave treated granite rock, Songklanakarin J. of Science and Technology, 2009, 31(4). — P. 447–452.
2. **Sahoo B. K., De S., and Meikap B. C.** Improvement of grinding characteristics of Indian coal by microwave pre-treatment, Fuel Processing Technology, 2011, 92. — P. 1920–1928.

3. **Jones D. A., Kingman S. W., Whittles D. N., and Lowndes I. S.** The influence of microwave energy delivery method on strength reduction in ore samples, *Chemical Engineering and Processing*, 2000, 46. — P. 291–299.
4. **Amankwah R. K. and Ofori-Sarpong G.** Microwave heating of gold ores for enhanced grindability and cyanide amenability, *Mineral Engineering*, 2011, 24. — P. 541–544.
5. **Singh V., Samuelraj I. O., Venugopal R., Jagadeesh G., and Banerjee P. K.** Study the effect of electrical and mechanical shock loading on liberation and milling characteristics of mineral materials, *Minerals Engineering*, 2014, 70. — P. 207–216.
6. **Wielen K. P. V., Pascoe R., Weh A., Wall F., and Rollinso G.** The influence of equipment settings and rock properties on high voltage breakage, *Minerals Engineering*, 2013, 46–47. — P. 100–111.
7. **Razavian S. M., Rezai B., and Irannajad M.** Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high-voltage electric pulses, *Advanced Powder Technology*, 2014, 25. — P. 1672–1678.
8. **Andrés U.** Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses, *Int. J. of Mineral Processing*, 2010, 97. — P. 31–38.
9. **Garrentón L. F. G., Hernandez Y. P. V., and Lambert C. V.** Application of ultrasound in comminution, *Ultrasonics*, 2000, 38. — P. 345–352.
10. **Fitzgibbon K. E. and Veasey T. J.** Thermally-assisted liberation – A review, *Minerals Engineering*, 1990, 3(1-2). — P. 181–85.
11. **Mokhfi T. and William P. A.** Temperature effects on physical and mechanical behaviour of granite: experimental investigation of material damage, *J. of ASTM International*, 2008, 5(3). — P. 1–13.
12. **Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., and Alarcón J. C.** Temperature influence on the physical and mechanical properties of porous rock: San Julian’s calcarenite, *Engineering Geology*, 2013, 167. — P. 117–127.
13. **Wonnacott G. and Wills B. A.** Optimisation of thermally assisted liberation of a tin ore with the aid of computer simulation, *Mineral Engineering*, 1990, 3(1-2). — P. 187–198.
14. **Lytle J., Choi N. and Prisbrey K.** Influence of preheating on grindability of coal, *Int. J. of Mineral Processing*, 1992, 36. — P. 107–112.
15. **Masri M., Sibai M., and Shao J. F.** Mainguy M., Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behaviour of tournemire shale, *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70. — P. 185–191.
16. **Shi L. and Jinyu X.** An experimental study on the physica-mechanical properties of two post-high-temperature rocks, *Engineering Geology*, 2014,185. — P. 63–70.
17. **Takarli M. and Prince-Agbojjan W.** Temperature effects on physical properties and mechanical behaviour of granite: experimental investigation of material damage, *J. of ASTM International*, 2008, 5(3). — P. 1–13.
18. **Somani A., Nandi T. K., Pal S. K., and Majumder A. K.** Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices, *Int. J. of Mining Science and Technology*, 2017, Vol. 27, No. 2. — P. 339–348.
19. **Cha M., Yin X., Kneafsey T., Johanson B., Alqahtani N., Miskimins J., Patterson T., and Wu Y.** Cryogenic fracturing for reservoir stimulation-laboratory studies, *J. of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 124. — P. 436–450.
20. **Gupta D. V. S. and Bobier D. M.** The history and success of liquid CO₂/N₂ fracturing system, SPE-40016-MS: Canadian Fracmaster Ltd., 1998.
21. **National Materials Advisory Board**, Comminution and Energy Consumption: Report of the Committee on Comminution and Energy Consumption, Washington (D. C.), National Research Council, 1981.

22. **Banerjee T., Bandyopadhyay S., and Das P. K.** Cryogenic stone crushing: A review and prediction, *Int. J. of Innovative Research in Science*, 2013, 2. — P. 2310–2314.
23. **Zoru K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H. A., and Acikalin S.** Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models, *Engineering Geology*, 2008, Vol. 96, Issues 3–4. — P. 141–158.
24. **Shakoor A. and Bonelli R. E.** Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1991, 28. — P. 55–71.
25. **Ulrich T. J. and Darling T. W.** Observation of anomalous elastic behavior in rock at low temperatures, *Geophysical research letters*, 2001, Vol. 28, No. 11. — P. 2293–2296.
26. **Hanley E. J., Dewitt D. P., and Roy R. F.** The thermal diffusivity of eight well-characterized rocks for the temperature range 300–1000 K, *Engineering Geology*, 1978, Vol. 12. — P. 31–47.
27. **Cai C., Li G., Huang Z., Shen Z., and Tian S.** Rock pore structure damage due to freeze during liquid nitrogen fracturing, *Arab. J. Sci. Eng.*, 2014, 39. — P. 9249–9257.
28. **Cai C., Li G., Huang Z., Shen Z., Tian S., and Fu X.** Experiment of coal damage due to super-cooling with liquid nitrogen, *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 22. — P. 42–48.
29. **Cai C., Gao F., Li G., Huang Z., and Hou P.** Evaluation of coal damage and cracking characteristics due to liquid nitrogen cooling on the basis of the energy evolution laws, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 29, 2016. — P. 30–36.
30. **Rao Q.-h., Wang Z., Xie H.-f., and Xie, Q.** Experimental study of properties of sandstone at high temperature, *J. of Central South University of Technology (English Edition)* 14 (s1), 2007. — P. 478–483.
31. **Smol'nikov E. A., and Kossovich G. A.** Cold treatment of cutting tools, *Metal Science and Heat Treatment*, 1980, Vol. 22, No. 10. — P. 704–705.

Поступила в редакцию 30/III 2017