

происхождение и значение. Новосибирск: изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 53 с.

17. Разработка технологий синтеза монокристаллов, различных композитных материалов и устройств для медико-экологических и технических целей на основе микро- наноалмазного сырья Попигайской астроблемы / *Петровский В.А., Виноградов С.Н., Колядин А.В. и др.* // Геоматериалы для высоких технологий, алмазы, благородные металлы, самоцветы Тимано-Североуральского региона: Материалы Всероссийского минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2010. С. 26-27.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Шеков В.А., Иванов А.А., Мясникова О.В.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

Процесс разрушения горных пород является многостадийным явлением и начинается он на самой ранней стадии формирования горного массива.

Этим положением и определяется тот факт, что все методы изучения горных пород, как правило, относятся к феноменологическим (опытным, экспериментальным), то есть основанным на испытании породы на соответствие определенным требованиям технологического процесса.

Для одних горных пород конечным элементом является частица, до которой необходимо измельчить исходные образцы, для других горных пород конечным элементом является большая поверхность, которую необходимо сохранить.

Объединяющим для всех горных пород является факт, что горные породы нельзя идеализировать, как это делается в механике или физике твердого тела, потому что изначально в них имеется набор дефектов, определяющих их конкретные свойства и дальнейшее поведение. К сожалению, во многих случаях отсутствует корреляция между будущим поведением горной породы при получении конечного продукта и в процессе его эксплуатации.

Одним из фундаментальных понятий для любого материала является его долговечность. То есть время, в течение которого он «сопротивляется» оказываемым на него физическим нагрузкам.

К основным видам воздействия на камень можно отнести следующие:

1. Циклические

- замораживание - оттаивание
- нагревание – охлаждение;
- циклическое нагружение - разгрузка
- попеременное воздействие химическими «полями»

2. Динамические

- абразивный износ
- концентрированный удар (ударная волна)

3. Статические

- воздействие постоянной нагрузки в течение длительного времени

Все указанные воздействия обусловлены тектонофизическими процессами, происходящими в массивах горных пород. Рассмотрение отдельных аспектов поведения горной породы при тех или иных воздействиях может дать возможность получить картину эволюции сформировавшегося массива в процессе его тектонической переработки, понять механизм его разрушения и пригодность для дальнейшего использования его отдельных частей.

С прикладной точки зрения результатом такого воздействия становится разрушение облицовочного камня, то есть потеря его «внешнего» вида. Разрушение выражается в виде появления на поверхности абразивных воронок, устранения полировки с поверхности, появление множества видимых макротрещин и излом плиты (появление магистральной трещины на поверхности облицовочного камня).

В таких условиях достаточно трудно найти единый показатель, способный характеризовать долговечность природного камня и учесть всевозможные виды воздействий на него. Если определить долговечность облицовочного камня как способность сохранять привлекательный внешний вид в течение определенного времени, то понятно, что в условиях абразивного износа (облицовка пола) потеря внешнего вида наступит значительно раньше, чем в условиях, когда тот же камень используется для внутренней облицовки стен, а механизм разрушения мрамора будет в значительной степени отличаться от подобного поведения гранитов.

Оценка изменения прочностных свойств в результате наведения трещиноватости при различных физических воздействиях, выбор оптимального метода дезинтеграции и оценка соответствия минерального сырья каждого месторождения существующим требованиям является причиной развития представлений о качестве материала с позиций его прочности и механизмах его разрушения. Возможности существующих подходов к прогнозу прочностных характеристик горных пород как минерального сырья ограничены по видам

прогнозируемых характеристик (только пределы прочности как константы материала). Никак не учитывается зависимость пределов прочности от температуры и времени воздействия, а также изменение предела прочности и микротрещиноватости материала при различных механических, тепловых и электромагнитных воздействиях. Такая ситуация в значительной мере связана с недостаточностью используемых в существующих подходах к прогнозированию характеристик горных пород физических представлений о процессах разрушения. Другая конкретная причина ограниченности возможностей прогноза прочностных характеристик минерального сырья заключается в недостаточном учете их связей с трещиноватостью, естественной и наведенной различными физическими воздействиями.

В многочисленных экспериментах было установлено, что время до разрушения различных материалов зависит от величины нагрузки, скорости нагружения и температуры окружающей среды. Эмпирическая зависимость долговечности от температуры и величины приложенной нагрузки - уравнение долговечности для идеальных тел, предложенное С. Н. Журковым [1], имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right)$$

где $\tau_0 = 10^{-14} \div 10^{-12}$ - коэффициент, численно равный периоду тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке, U_0 - энергия активации разрушения; γ - структурно-зависимый коэффициент (активационный объем); σ - действующее растягивающее напряжение; R - универсальная газовая постоянная ($=8,314$ дж/моль*град); T - абсолютная температура

Величина U_0 для различных материалов хорошо коррелирует с энергией сублимации $U_{субл}$.

Формула Журкова применима в случае разрушения при постоянном напряжении, т.е. если напряжение σ создается в образце за время, пренебрежимое по сравнению с τ и выдерживается постоянным до момента разрушения τ .

В случае, если напряжение в образце изменяется со временем, например, линейно, обычно используется принцип суммирования повреждений, накапливающихся в материале (принцип Бейли), долговечность материала может быть определена из уравнения:

$$\int_0^t \frac{dt}{\exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right)} = \tau_0$$

Как было установлено в наших исследованиях, термокинетические параметры также зависят от трещиноватости. Согласно формулам, предложенным М.Г. Менжулиным [2], термокинетические параметры следующим образом зависят от концентраций трещин:

$$U_0 = U_{00} \left(\frac{N^* - n_1}{N^* - n_0}\right)^3 \quad \gamma = \gamma_0 \left(\frac{N^* - n_1}{N^* - n_0}\right)^2$$

$$\sigma^* = \frac{U_{00}}{\gamma_0} \left(\frac{N^* - n_1}{N^* - n_0}\right) \left[1 - \frac{kT}{U_{00}} \left(\frac{N^* - n_0}{N^* - n_1}\right)^3 \ln \frac{\tau}{\tau_0}\right]$$

где N^* - предельная концентрация трещин при разрушении, n_1 - действительная концентрация трещин в материале, n_0 - начальная концентрация, n_1 - реальная концентрация трещин, U_{00} - исходная энергия активации разрушения.

Значения «предельной» прочности (отношений энергии активации к активационному объему) для некоторых горных пород, термокинетические параметры которых нами получены экспериментально, показаны в таблице 1.

«Предельная» прочность $\sigma_{пр}$ действительно характеризует прочностные свойства материала и дает корректное соотношение между прочностными свойствами различных материалов, т.к. реальная прочность, например, гранита месторождения Сюсюкянсаари при комнатных температурах значительно превосходит значения критических напряжений такого гранита, как порфириновый гранит «Кузреченского» месторождения или гранатовый амфиболит месторождения «Нигрозеро», несмотря на более высокие, по сравнению с гранитом месторождения «Сюсюкянсаари», значения энергии активации.

Что определяет различия в термокинетических параметрах горных пород? Какую роль играют микротрещины в формировании прочностных характеристик горных пород?

Существуют ли различия в динамике изменения трещиноватости (и, если существуют, то какие) для одних и тех же материалов различных месторождений? Что является определяющим в динамике трещинообразования, минеральный состав породы или ее геологическая «предистория»?

Как зависит динамика изменения трещиноватости от начальной, естественной трещиноватости при ее циклическом нагружении?

Таблица 1. Значения "пределной" прочности для некоторых пород

Порода	Энергия активации (кДж/моль)	Активационный объем (кДж/моль*МПа)	"Пределная" прочность (МПа)
Гранит Сюскюянсаари, мелкозернистый	141	5,53	25,5
Гранит Кашина Гора, среднезернистый	173	15,0	11,5
Гранит Кузреченский, крупнозернистый	288	66,0	4,4
Амфиболит гранатовый Нигрозеро	754,5	164,5	4,6

Для решения этих вопросов динамика изменения трещиноватости была рассмотрена на примере гранитов месторождения «Кашина Гора» и габбродиабаз месторождения «Другорецкое» (средний участок).

В таблице 2 l/S – удельная трещиноватость, n – концентрация микротрещин, l_{cp} – средняя длина трещин.

Таблица 2. Результаты наблюдений показателей микротрещиноватости

№ образца	l/S (1/мм)	n (1/мм ²)	l_{cp} (мм)
P60-1 (Другая Река)	$4,14 \times 10^{-4}$	10^{-4}	4,14
P60-2(Другая Река)	$5,61 \times 10^{-5}$	10^{-4}	0,56
P60-3 (Другая Река)	$2,18 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-5}$	2,45
P60-4 (Другая Река)	10^{-5}	$2,22 \times 10^{-5}$	0,45
P60-5(Другая Река)	$3,96 \times 10^{-4}$	$4,44 \times 10^{-5}$	8,9
101/5-1 (Другая Река)	$2,71 \times 10^{-4}$	$7,78 \times 10^{-5}$	3,49
101/5-2 (Другая Река)	$4,78 \times 10^{-5}$	$6,67 \times 10^{-5}$	0,72
101/5-3 (Другая Река)	$1,13 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-5}$	1,27
101/5-4 (Другая Река)	$2,97 \times 10^{-4}$	$7,78 \times 10^{-5}$	3,81
101/5-5 (Другая Река)	$8,44 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$	1,9
1-а (Кашина Гора)	$1,13 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-3}$	1,3
1-б (Кашина Гора)	$5,7 \times 10^{-3}$	$2,67 \times 10^{-3}$	2,07
1-в (Кашина Гора)	$9,31 \times 10^{-3}$	$3,82 \times 10^{-3}$	2,31
1-г (Кашина Гора)	$1,27 \times 10^{-2}$	$4,82 \times 10^{-3}$	2,95
1-д (Кашина Гора)	$4,68 \times 10^{-3}$	$2,67 \times 10^{-3}$	1,08

Из результатов таблицы видно, что в зависимости от породы и месторождения удельная трещиноватость и концентрация трещин на единицу площади поверхности изменяется на пять порядков величины. Средняя длина трещин изменяется в пределах одного порядка величины, зависит больше от месторождения (или, даже, участка месторождения с его параметрами напряженного состояния), из которого взяты образцы.

В зависимости от месторождения, для одной и той же породы удельная трещиноватость и концентрация трещин изменяется в пределах трех порядков величины.

Для одного и того же месторождения одной и той же породы удельная трещиноватость и концентрация микротрещин меняется от образца к образцу в пределах одного порядка величины.

Результаты показывают также «нечувствительность» трещиноватости к способу отбора проб, т.к. проба P60 была вырезана из монолита, а данные ее трещиноватости по всем трем параметрам почти не отличаются от данных пробы. Таблица 3 характеризует динамику изменения удельной трещиноватости в процессе замораживания – оттаивания образцов.

Рост средней длины трещин говорит о том, что при таких процессах не происходит образования новых трещин, но идет рост существующих.

Анализ прочности при одноосном сжатии для данных типов горных пород до и после попеременного замораживания-оттаивания демонстрирует снижение прочности для гранита на 9%, для габбродиабаз на 5%.

Из приведенных таблиц видно, что в зависимости от породы и месторождения удельная трещиноватость и концентрация трещин на единицу площади поверхности изменяется на значительную величину. Средняя длина трещин изменяется в пределах одного порядка величины, зависит больше от месторождения (или, даже, участка месторождения), с которого взяты образцы.

Таблица 3. Динамика изменения удельной трещиноватости $l_{\text{общ}}/S$ (1/мм) от количества циклов замораживания - оттаивания

№ образца	№ цикла замораживания-оттаивания				
	0	15	30	45	50
1-а (Кашина Гора)	$1,13 \times 10^{-2}$	$1,19 \times 10^{-2}$	$1,23 \times 10^{-2}$	$1,81 \times 10^{-2}$	$2,42 \times 10^{-2}$
1-б(Кашина Гора)	$5,7 \times 10^{-3}$	$6,04 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^{-2}$
1-в(Кашина Гора)	$9,31 \times 10^{-3}$	$9,67 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,62 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-2}$
1-г(Кашина Гора)	$1,27 \times 10^{-2}$	$1,58 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-2}$	$2,92 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$
1-д(Кашина Гора)	$4,68 \times 10^{-3}$	$5,88 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-2}$	$1,16 \times 10^{-2}$
P60-1 (Другая Река)	$9,78 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,95 \times 10^{-4}$	$2,21 \times 10^{-4}$	$2,21 \times 10^{-4}$
P60-2(Другая Река)	$8,56 \times 10^{-5}$	$8,56 \times 10^{-4}$	$9,67 \times 10^{-5}$	$9,67 \times 10^{-5}$	$9,67 \times 10^{-5}$
P60-3(Другая Река)	$4,02 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$
P60-4(Другая Река)	$4,56 \times 10^{-4}$	$4,56 \times 10^{-4}$	$4,56 \times 10^{-4}$	$4,56 \times 10^{-4}$	$4,56 \times 10^{-4}$
101/5-1(Другая Река)	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$
101/5-2(Другая Река)	$9,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-5}$
101/5-3(Другая Река)	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$
101/5-4(Другая Река)	$8,33 \times 10^{-5}$	$8,33 \times 10^{-5}$	$8,33 \times 10^{-5}$	$8,33 \times 10^{-5}$	$8,33 \times 10^{-5}$
101/5-5(Другая Река)	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$

Таблица 4. Динамика изменения концентрации трещин n (1/мм²) от количества циклов замораживания-оттаивания

№ образца	№ цикла замораживания-оттаивания				
	0	15	30	45	50
1-а	$9,5 \times 10^{-3}$	$4,79 \times 10^{-3}$	$5,63 \times 10^{-3}$	$6,25 \times 10^{-3}$	$7,08 \times 10^{-3}$
1-б	$2,67 \times 10^{-3}$	$2,29 \times 10^{-3}$	$5,20 \times 10^{-3}$	$6,46 \times 10^{-3}$	$6,88 \times 10^{-3}$
1-в	$3,82 \times 10^{-3}$	$3,96 \times 10^{-3}$	$6,25 \times 10^{-3}$	$7,29 \times 10^{-3}$	$7,51 \times 10^{-3}$
1-г	$4,82 \times 10^{-3}$	$5,42 \times 10^{-3}$	$7,08 \times 10^{-3}$	$8,0 \times 10^{-3}$	$8,33 \times 10^{-3}$
1-д	$2,67 \times 10^{-3}$	$2,92 \times 10^{-3}$	$5,69 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}	$5,70 \times 10^{-3}$
P60-1	10^{-4}	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,31 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$
P60-2	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-4}$
P60-3	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$
P60-4	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$
101/5-1	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$
101/5-2	$1,56 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-4}$
101/5-3	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-4}$
101/5-4	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$
101/5-5	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$

Таблица 5. Динамика изменения средней длины трещин $l_{\text{ср}}$ (мм) от количества циклов замораживания - оттаивания

№ образца	№ цикла замораживания-оттаивания				
	0	15	30	45	50
1-а	1,3	2,49	2,18	2,89	3,41
1-б	2,07	2,63	2,61	2,21	2,46
1-в	2,31	2,44	2,56	2,22	2,36
1-г	2,95	2,91	3,57	3,65	4,08
1-д	1,08	2,01	2,04	2,20	2,05
P60-1	0,98	1,46	1,45	1,84	1,74
P60-2	0,77	0,77	0,95	0,95	0,95
P60-3	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
P60-4	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
101/5-1	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
101/5-2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
101/5-3	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
101/5-4	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
101/5-5	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

Для одного и того же месторождения одной и той же породы удельная трещиноватость и концентрация микротрещин меняется от образца к образцу в пределах одного порядка величины. Наибольшие значения показателей соответствуют более крупнозернистой горной породе. При щадящих нагрузках трещина растет до

первого препятствия и останавливается, в данном случае это граница зерна. Следовательно, для мелкозернистой породы, представленной габбродиабазом, параметры микротрещиноватости ниже, т.к. для трещин нет пространства внутри зерна для дальнейшего роста.

С нашей точки зрения именно этим во многом и объясняются различия в свойствах для различного типа пород.

Таким образом, можно предполагать, что природа разрушения большинства исследованных гранитов в «естественных» условиях подчиняется термокинетическому закону. «Предельная» прочность материалов характеризует их реальные прочностные характеристики и зависит от количества микродефектов.

Долговечность пород магматического происхождения имеет единую природу для различных условий воздействия на него и основывается на развитии микротрещин в горной породе. При таком подходе термокинетическая теория прочности может быть использована при моделировании процессов, происходящих при различных воздействиях на массив или образец конечного образца, учитывая при этом реальные изменения его состояния через учет микроповреждений в нем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974.
2. *Менжулин М.Г.* Фазовые переходы на поверхностях трещин при разрушении горных пород. ДАН РФ. Т. 328. № 3. 1993.