

УДК 551.435.626

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ МОРФОЛОГИИ
ПОВЕРХНОСТИ ТРЕЩИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

**В. В. Середин¹, Л. О. Лейбович², М. В. Пушкарева³,
И. С. Копылов¹, А. С. Хрулев¹**

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Букирева, 15, 614990, г. Пермь, Россия

²Научно-исследовательское проектное и производственное предприятие
по природоохранной деятельности “Недра”,
ул. Льва Шатрова, 13а, 614064, г. Пермь, Россия

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия

Установлено, что между напряженным состоянием материалов и шероховатостью поверхности “магистральной” трещины разрушения существует взаимосвязь: с увеличением максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения материалов, на площадке максимальных касательных напряжений шероховатость уменьшается. На основании выявленной закономерности разработан способ определения напряженного состояния материала по величине шероховатости поверхности его разрушения.

“Магистральная” трещина разрушения, напряженное состояние, шероховатость, горные породы

В настоящее время существует ряд гипотез, объясняющих механизм разрушения материалов, на основании которых разработаны критерии оценки прочности и деформируемости горных пород. При этом критерии одних авторов [1–5] не объясняют внутренний механизм разрушения материалов, но они просты в расчетах и достаточно надежно описывают состояние горных пород. Критерии других [6–10] основаны на внутреннем механизме разрушения горных пород, однако расчет энергии формирования трещин разрушения достаточно сложный, поэтому данные критерии не нашли широкого применения на практике. Исследователи, занимающиеся вопросами прочности материалов, всегда стремились разработать универсальный критерий прочности. По нашему мнению, разработку подобного критерия следует основывать на внутреннем механизме разрушения горных пород.

Важными задачами являются: исследование морфологии поверхности “магистральной” трещины разрушения горных пород при их нагружении, выявление закономерностей формирования поверхности разрушения и разработка критериев оценки напряженного состояния горных пород.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом:

— из пенобетона и каменной соли изготавливались образцы по методике, изложенной в работе [11]. Образцы гипса изготавливались из гипсовой пасты путем формовки с последующей сушкой;

— образцы материалов испытывались на одноосное растяжение, сжатие и в условиях объемного напряженного состояния [12–14]. Каменная соль исследовалась при боковых давлениях ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5–20$ МПа) в стабилометре конструкции ВНИМИ [14]. Проведено три цикла испытаний: I цикл — при боковых давлениях 5 МПа, II цикл — 10 МПа, III цикл — 20 МПа. Гипс и пенобетон исследовались в стабилометре конструкции “Геотек”. Для пенобетона проведено три цикла испытаний: I цикл — при боковых давлениях 0.1 МПа, II — 0.3 МПа, III — 0.5 МПа. Испытания для гипса проведены только в параметрах I цикла в связи с ограниченными возможностями прибора;

— морфология поверхности разрушения материала в зоне “магистральной” трещины разрушения при заданных σ_n оценивалась через показатели Rz и Sz. Под Rz понимается величина шероховатости исследуемой поверхности. Измерение Rz проводилось индикатором часового типа с ценой деления 0.01 мм по методике, изложенной в [15]. Под Sz понимается стандартное (среднеквадратичное) отклонение Rz, а под σ_n — значение максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения материалов (на площадке максимальных касательных напряжений). Определение σ_n проводилось по формуле

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — главные нормальные напряжения, МПа; α — угол наклона площадки (зоны разрушения) с максимальными касательными напряжениями: $\alpha = 45 - \varphi/2$, где φ — угол внутреннего трения, град.

Всего в эксперименте исследовано 116 образцов, из них на одноосное сжатие 30, на одноосное растяжение — 32 и в объемном напряженном состоянии испытано 54 образца. Средние значения характеристик, полученных при экспериментальных исследованиях, приведены в таблице.

Горная порода	Одноосное растяжение, МПа		Одноосное сжатие, МПа		Объемное напряженное состояние, МПа										
					I цикл испытаний			II цикл испытаний			III цикл испытаний				
	σ_n	Sz	Rz	σ_n	Sz	Rz	σ_n	Sz	Rz	σ_n	Sz	Rz	σ_n	Sz	Rz
Гипс (искусственный)	0.62	0.26	0.47	5.2	0.17	0.24	9.1	0.16	0.21	—	—	—	—	—	—
Пенобетон	0.21	0.56	0.82	2.7	0.38	0.55	5.7	0.31	0.42	12.2	0.21	0.40	15.2	0.2	0.36
Каменная соль	1.50	1.81	2.82	5.1	0.53	1.08	13.8	0.41	0.82	23.7	0.30	0.56	30.0	0.2	0.41

Кроме того, исследовалась плотность и пористость образцов, структура материала на поверхности трещины разрушения, а также гранулометрический состав песка трения, находящегося в зоне разрушения материала [18].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволяют рассмотреть два вопроса: первый — закономерности изменения шероховатости поверхности трещины разрушения в зависимости от максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения; второй — процессы, протекающие в зоне разрушения материала в зависимости от максимальных нормальных напряжений, действующих в этой же зоне.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице, показывает, что для трех исследуемых материалов значения шероховатости поверхности трещины разрушения Rz являются максимальными при одноосном растяжении, а в условиях сжатия материалов они уменьшаются (рис. 1, 2).

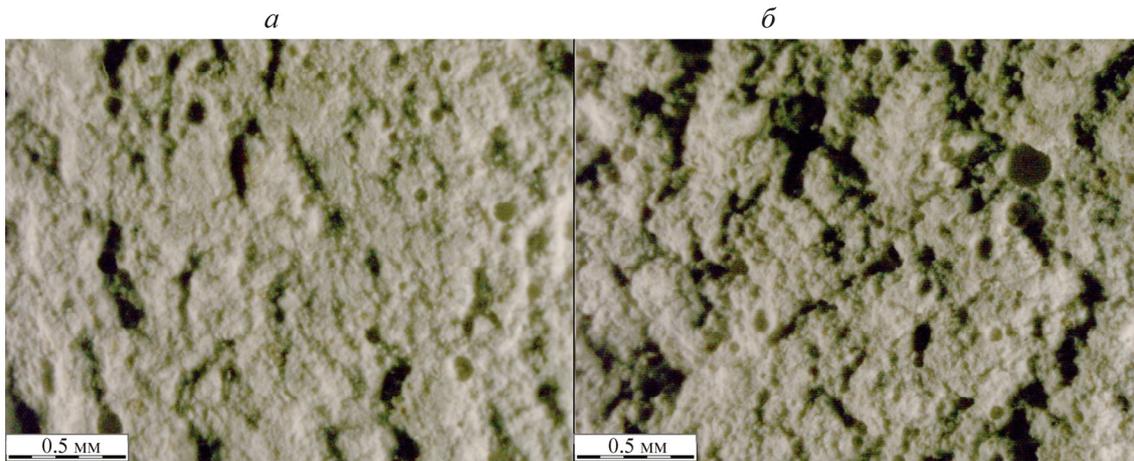


Рис. 1. Морфология поверхности разрушения гипса при одноосном сжатии (а) и растяжении (б)

Значение стандартного отклонения Sz также изменяется закономерно: с увеличением σ_H наблюдается уменьшение Sz , поэтому показатели Rz и Sz можно использовать в качестве классификационных признаков для оценки напряжения, при котором произошло разрушение материала.

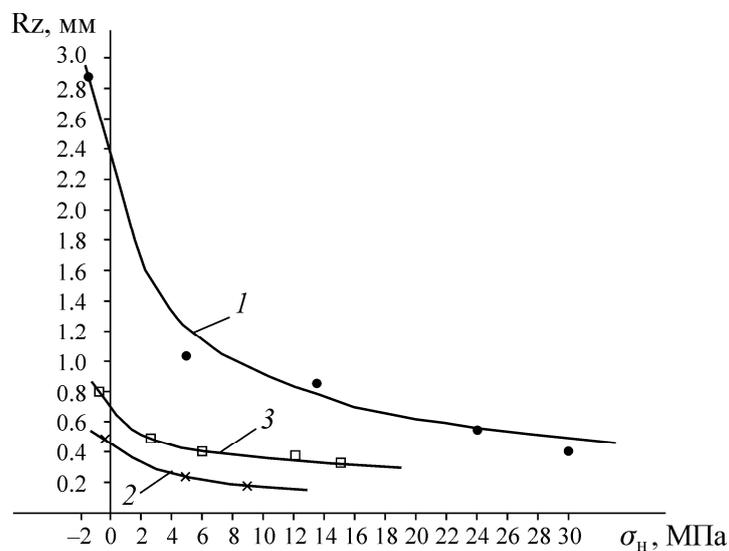


Рис. 2. Изменение шероховатости (Rz) поверхности “магистральной” трещины разрушения материалов в зависимости от σ_H : 1 — каменная соль; 2 — гипс; 3 — пенобетон

Изменение морфологии поверхности “магистральной” трещины разрушения показывает, что оно обусловлено физико-химическими процессами. Рассмотрим эти процессы в зависимости от вида и величины напряжений σ_H , действующих в зоне разрушения пород.

Экспериментальные исследования (рис. 2) показывают, что зависимость шероховатости от σ_H можно разделить на два участка: первый участок (левая сторона от оси ординат) находится в зоне растягивающих напряжений. Здесь “магистральная” трещина разрыва формируется по

дефектам (микротрещинам, порам и т. д.). Шероховатости R_z поверхности разрушения принимают максимальные значения по сравнению с участком сжатия, при этом стандартное отклонение S_z также характеризуется максимальным значением. Следует отметить, что для искусственных материалов (гипс и пенобетон) с увеличением пористости значение R_z увеличивается. Так, в пенобетоне, имеющем пористость 80 %, значение $R_z = 0.82$ мм, а в гипсе при средней пористости 20 % $R_z = 0.47$ мм.

На поверхности трещины разрушения исследуемый материал не изменяет свой первоначальный минеральный состав, а также свою первоначальную структуру: каменная соль имеет порфирированную, гипс — поликристаллическую (см. рис. 1б), пенобетон — ячеистую. В зоне разрушения песок трения не обнаружен.

Второй участок (рис. 2, правая сторона от оси ординат) находится в зоне сжимающих напряжений. На этом участке “магистральная” трещина разрыва формируется по дефектам за счет растягивающих и сдвигающих напряжений. Зона нарушения сложена частицами или блоками [16]. По данным [17], ширина зоны нарушения в сыпучем материале составляет 20–30 размеров частиц, а в скальных грунтах — 1 мм.

Шероховатости поверхности разрушения принимают здесь меньшие значения, чем при растяжении. При этом с увеличением σ_n значения R_z и S_z уменьшаются. На поверхности трещины разрушения исследуемый материал не изменяет свой минеральный состав, однако его первоначальная структура изменяется. Так, в каменной соли, гипсе и пенобетоне первоначальная структура преобразуется в полосчатую, ориентированную в сторону сдвига структуру (рис. 2а). В зоне разрушения обнаружен песок трения, преимущественно пылевой фракции.

На основании полученной информации можно предположить, что в формировании поверхности “магистральной” трещины разрыва принимают участие следующие процессы: срез “неровностей” на поверхности трещины разрушения, диспергации “обломков”, изменение первоначальной структуры материала.

Следует отметить, что приведенные результаты экспериментальных исследований получены при максимальных нормальных напряжениях до 30 МПа, действующих в зоне разрушения материалов. Однако возникает естественный вопрос: какие процессы будут протекать при напряжениях более 30 МПа?

По данным работы [17], для значений максимальных нормальных напряжений от 30 до 250 МПа в зоне разрушения материалов протекают следующие процессы: срез “неровностей” поверхности разрушения и измельчение “обломков”. В [18] установлено, что на поверхности “магистральной” трещины разрушения формируется ориентированная структура. Следует отметить, что верхняя граница максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения материалов, — 250 МПа определена достаточно условно (для каждого типа материалов она будет своя), однако это необходимо для разделения физических и химических процессов, протекающих в зоне разрушения в зависимости от сжимающих нагрузок.

Для значений $\sigma_n > 250$ МПа происходит дальнейшее дробление “обломков” до размеров кристаллов [19], изменяется структура материнской породы [19], протекают твердофазные химические реакции [20] и образуются новые минералы (вещества) [21, 22]. Так, в работе [20] установлено, что при сжатии до 750 МПа пятиводного кристаллогидрата сульфата меди происходят твердофазные химические реакции, которые реализуются в виде взрыва и образования нового вещества — металлической меди. Экспериментальные исследования показали, что при на-

гружении ортопироксена ($\sigma_2 = \sigma_3 = 1000$ МПа и $\sigma_1 = 2700$ МПа) наблюдалось его преобразование — в зоне разрушения образовались новые минералы: тальк, в меньшей мере карбонаты, плагиоклаз и другие минералы [21, 22]. Подобные результаты получены и в работе [23].

ВЫВОДЫ

На основании экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в зоне разрушения материала в зависимости от максимальных нормальных напряжений, действующих в этой же зоне, протекают последовательно следующие процессы: срез “неровностей” на поверхности трещины разрушения, диспергация “обломков”, изменение первоначальной структуры материала, образование новых (отличных от материнской породы) минералов и твердофазных химических реакций.

Процессы среза “неровностей” на поверхности трещины разрушения, диспергации “обломков”, изменения первоначальной структуры материала при нормальных напряжениях до 30 МПа, действующих в зоне разрушения материалов, можно описать величинами шероховатости поверхности разрушения Rz и стандартного отклонения Sz и использовать в качестве классификационных признаков для оценки напряжений, при которых произошло разрушение материала.

Задачей последующих исследований является разработка количественных критериев, описывающих процессы разрушения пород, и методов оценки напряженного состояния материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Партон В. З., Морозов Е. М.** Механика упругопластического разрушения. — М.: Наука, 1974.
2. **Мор О.** Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала? // Новые идеи в технике: сб. № 1. — Петроград: Образование, 1915.
3. **Карман Т.** Попыты по всестороннему сжатию // Новые идеи в технике: сб. № 1. — Петроград: Образование, 1915.
4. **Давиденков Н. Н.** Механические испытания металлов. — М., 1936.
5. **Фридман Я. Б.** Единая теория прочности материалов. — М., 1943.
6. **Griffith A. A.** The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1921, Vol. 221, No. 2.
7. **Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.** Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989.
8. **Irwin G. R.** Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *J. Appl. Mech.*, 1957, Vol. 24, No. 3.
9. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974.
10. **Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г.** Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001.
11. **ГОСТ 21153.0-75.** Породы горные. Отбор и общие требования к методам физических испытаний.
12. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
13. **ГОСТ 21153.3-85.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.
14. **Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф.** Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969.
15. **ГОСТ 2789-73.** Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

16. **Косых В. П.** Закономерности распределения скачков смещений при срезе сыпучих материалов в стесненных условиях // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
17. **Бобряков А. П.** О механизме прерывистого скольжения в сыпучей среде // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
18. **Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т.** Грунтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973.
19. **Куксенко В. С., Махмудов Х. В., Мансуров В. А., Султанов У., Рустамова М. З.** Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. — 2009. — № 4.
20. **Ениколопян Н. С., Мхитарян А. А., Карагезян А. С.** Сверхбыстрые реакции разложения в твердых телах под давлением // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 288. — № 3.
21. **Чиков Б. М., Каргаполов С. А., Ушаков Г. Д.** Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. — 1989. — № 6.
22. **Чиков Б. М.** Проблемы геологической интерпретации сейсмоочаговых систем земной коры (геомеханика и тектонофизический анализ) // Геодинамика и тектонофизика. — 2010. — № 3.
23. **Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Осипов С. Л.** Механоактивизация минерального вещества как предпосылка стресс-преобразований в линеаментных зонах / Структура линеаментных зон стресс-метаморфизма. — Новосибирск: Наука, 1990.

Поступила в редакцию 1/III 2013