

УДК 551.435.626

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОМАТЕРИАЛОВ

В. В. Середин, А. С. Хрулев, М. В. Пушкарева

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: seredin@nedra.perm.ru, ул. Букирева, 15, 614990, г. Пермь, Россия*

Шероховатость поверхности магистральной трещины разрушения служит критерием оценки напряженного состояния геоматериалов. Это обусловлено тем, что между шероховатостью и напряженным состоянием геоматериала выявлена количественная связь. Установлено, что с увеличением максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения геоматериалов (на площадке максимальных касательных напряжений), шероховатость уменьшается. На основании этой закономерности разработан способ определения напряженного состояния геоматериалов по значению шероховатости поверхности разрушения.

Шероховатость поверхности магистральной трещины разрушения, напряженное состояние геоматериалов, горные породы

При решении ряда геологических и инженерных задач необходимо знание напряженного состояния элементов сооружения. Для оценки напряженного состояния геоматериалов применяются методы, которые можно объединить в две группы. В первую входят методы, по которым оценивается напряженное состояние геоматериала до его разрушения — это неразрушающие методы контроля. В основу их положены такие критерии, как звуковое давление, температура, ультразвук и др. [1–4].

Ко второй группе относятся методы, по которым оценивается напряженное состояние геоматериала после его разрушения. Разработка методов второй группы обусловлена тем, что в практике часто встречаются случаи, когда проектные решения (расчетные модели) не обеспечивают в полной мере устойчивость инженерных объектов. Это приводит к аварийным ситуациям на них, в связи с чем необходима информация о реальных нагрузках (напряжениях), при которых произошло разрушение геоматериала. Такие методы в качестве инструмента особенно важны экспертам, выявляющим причины аварий на инженерных объектах. Кроме того, эта информация позволит провести корректировку расчетных моделей, что повысит надежную эксплуатацию сооружений.

Цель настоящей работы — разработка метода оценки напряженного состояния геоматериалов. Для этого решались следующие задачи: выбор и обоснование критериев оценки напряженного состояния геоматериалов; разработка метода оценки напряженного состояния геоматериалов. Отметим, что данная работа является продолжением начатых ранее исследований [5, 6] по изучению процессов, протекающих в зоне магистральной трещины разрушения.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

В работе [6] исследованы взаимосвязи между напряженным состоянием геоматериалов и шероховатостью Rz поверхности магистральной трещины разрушения. Выявлено, что при одноосном растяжении Rz принимает большие значения, чем при одноосном сжатии. В условиях сжатия установлено закономерное уменьшение Rz с увеличением максимальных нормальных напряжений σ_n , действующих в зоне разрушения геоматериалов. Поэтому в качестве критерия оценки напряженного состояния геоматериалов можно использовать показатель Rz .

При нагружении геоматериалов до разрушения в зоне магистральной трещины разрушения наблюдается увеличение температуры Δt исследуемых материалов. При этом в условиях одноосного растяжения Δt принимает меньшие значения, чем при одноосном сжатии [5]. В зоне растягивающих напряжений на поверхности трещины разрушения исследуемый геоматериал не изменяет свой первоначальный минеральный состав, а также свою первоначальную структуру: каменная соль имеет порфиривидную, гипс — поликристаллическую (рис. 1б), пенобетон — ячеистую [6].

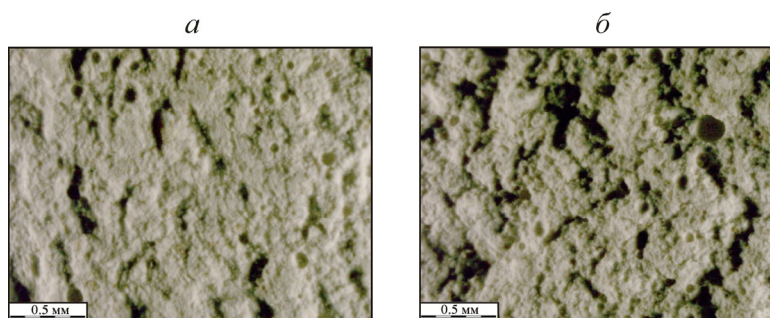


Рис. 1. Структура гипса на поверхности трещины разрушения при одноосном сжатии (а) и одноосном растяжении (б)

В зоне сжимающих напряжений на поверхности трещины разрушения исследуемый геоматериал изменяет первоначальный состав и структуру. Так, в каменной соли, гипсе и пенобетоне первоначальная структура преобразуется в полосчатую, ориентированную в сторону сдвига, структуру (рис. 1а). В зоне разрушения обнаружен песок трения, преимущественно пылеватой фракции [6, 7].

Исследованию процессов, происходящих в геоматериалах под действием сжимающих напряжений, посвящены работы [8–13]. Установлено, что в геоматериалах происходит дробление “обломков” до размеров кристаллов, изменяется структура материнской породы, протекают твердофазные химические реакции и образуются новые минералы (вещества).

Таким образом, для оценки напряженного состояния геоматериалов теоретически можно использовать следующие критерии: шероховатость Rz поверхности магистральной трещины разрушения; температуру Δt в зоне магистральной трещины разрушения; изменение первоначальной структуры геоматериалов магистральной трещины разрушения; изменение минерального состава материнской породы магистральной трещины разрушения.

Анализ возможностей использования перечисленных критериев для оценки напряженного состояния материала показал, что наиболее надежным является шероховатость Rz поверхности магистральной трещины разрушения. Это обусловлено тем, что между Rz и напряженным состоянием геоматериала установлена количественная связь. Остальные показатели отражают качественные изменения напряженного состояния материалов.

Метод оценки напряженного состояния геоматериалов включает следующие операции:

1. Из материала исследуемой конструкции сооружения изготавливаются образцы, которые испытывают в условиях одноосного сжатия и растяжения, а также в объемном напряженном состоянии.

2. По данным испытаний строится паспорт прочности геоматериала и рассчитываются максимальные нормальные напряжения σ_n , действующие в зоне разрушения геоматериалов для каждого вида напряженного состояния (рис. 2).

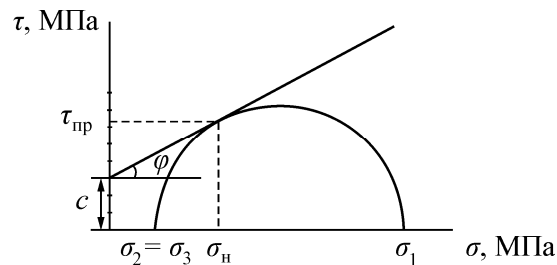


Рис. 2. Паспорт прочности геоматериала: максимальные нормальные напряжения σ_n , угол внутреннего трения φ , сцепление c , главные нормальные напряжения σ_1 и σ_2 и предельное сопротивление сдвигу $\tau_{пр}$

3. После испытаний образцов (их разрушения) определяется шероховатость поверхности Rz магистральной трещины для каждого вида напряженного состояния геоматериала — одноосных сжатия и растяжения, объемного напряженного состояния [6].

4. Строится номограмма изменения шероховатости Rz поверхности магистральной трещины разрушения геоматериалов в зависимости от σ_n .

5. Отбирается образец геоматериала из зоны магистральной трещины разрушения исследуемого элемента сооружения. В нем рассчитывается шероховатость Rz_1 поверхности магистральной трещины разрушения.

6. По значению Rz_1 , используя полученную номограмму (п. 4), находится напряжение σ_n .

7. Затем по σ_n , согласно паспорту прочности геоматериала (рис. 2), вычисляется напряженное состояние σ_1 и σ_2 , при котором произошло разрушение геоматериала, слагающего элемент конструкции сооружения путем построения круга Мора.

8. По данным напряженного состояния геоматериала определяются значения прочности: предельное сопротивление сдвигу $\tau_{пр}$ и угол внутреннего трения φ , при котором произошло разрушение геоматериала, слагающего конструкцию сооружения (рис. 2).

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА

При оптимизации, например параметров разработки калийных месторождений, необходима информация о виде напряженного состояния целика, в котором он работает, а также предельные прочностные характеристики геоматериала (каменной соли), при котором целик находится в устойчивом состоянии.

В методическом плане предложенный способ реализуется следующим образом:

1. Отбираются монолиты каменной соли, из них изготавливаются образцы по методике, изложенной в [14]. Образцы геоматериалов испытываются на одноосное (σ_p) растяжение, (σ_c) сжатие и в условиях объемного напряженного состояния $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ [14]. Каменная

соль исследуется при боковых давлениях ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5 - 15$ МПа) в стабилометре конструкции ВНИМИ [14]. Проводятся три цикла испытаний: I цикл — при боковых давлениях 5 МПа, II цикл — 10 МПа, III цикл — 15 МПа.

2. По результатам исследований строится паспорт прочности каменной соли (рис. 3).

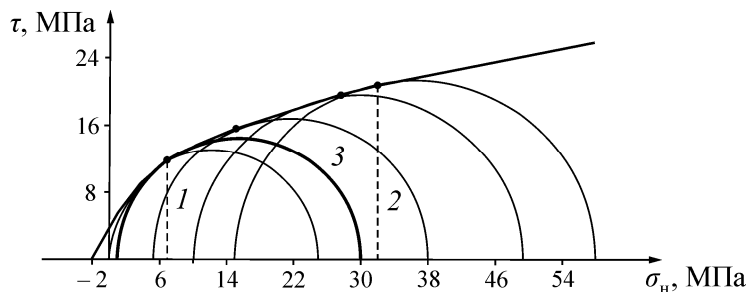


Рис. 3. Паспорт прочности каменной соли: 1 — определение точки касания к огибающей кругов напряжений Мора по данным $\sigma_{н,р}$; 2 — определение σ_n ; 3 — круг напряжений Мора, построенный по данным $\sigma_{н,р}$

3. После испытаний образцов (их разрушения) определяется шероховатость поверхности Rz магистральной трещины для каждого вида напряженного состояния геоматериала — одноосных сжатия и растяжения, объемного напряженного состояния по методике, изложенной в [14]. Результаты измерений Rz (в мм) приведены в таблице.

Геоматериал	Одноосное растяжение, МПа		Одноосное сжатие, МПа		Объемное напряженное состояние, МПа					
					I цикл испытаний		II цикл испытаний		III цикл испытаний	
	σ_n	Rz	σ_n	Rz	σ_n	Rz	σ_n	Rz	σ_n	Rz
Каменная соль	-1.5	2.82	4.0	1.08	13.8	0.82	26.7	0.56	32.0	0.41

4. Определение σ_n проводится графически, как ордината к точке касания круга Мора и огибающей предельных кругов напряжений Мора. Так, при разрушении геоматериала в объемном напряженном состоянии в III цикле $\sigma_n = 32$ МПа (рис. 3, поз. 2). Результаты расчета σ_n приведены в таблице.

5. Строится номограмма изменения шероховатости Rz поверхности магистральной трещины разрушения геоматериалов в зависимости от σ_n (рис. 4).

6. Отбирается образец из зоны магистральной трещины разрушения геоматериала, слагающего разрушенный элемент конструкции сооружения. В нем рассчитывается шероховатость Rz_1 поверхности магистральной трещины разрушения (например, $Rz_1 = 1.2$ мм).

7. По величине $Rz_1 = 1.2$ мм, используя полученную номограмму (рис. 4), вычисляют максимальные нормальные напряжения, действующие в зоне разрушения геоматериалов: $\sigma_{н,р} = 7$ МПа.

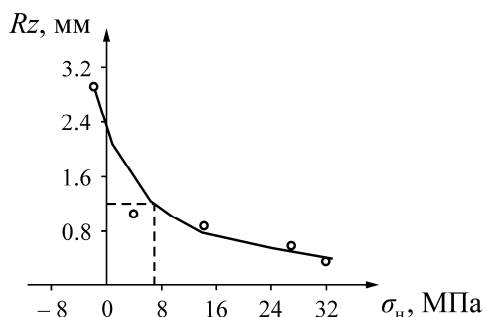


Рис. 4. Номограмма изменения шероховатости Rz поверхности магистральной трещины разрушения каменной соли в зависимости от σ_n

8. Затем по $\sigma_{н,р} = 7$ МПа, согласно паспорту прочности каменной соли (рис. 3, поз. 1), определяют точку касания с огибающей кругов напряжений Мора. С помощью этой точки строят круг напряжений Мора (рис. 3, поз. 3) и находят напряженное состояние геоматериала $\sigma_{2р} = 1$ МПа и $\sigma_{1р} = 30$ МПа, при котором произошло разрушение элемента сооружения.

9. По полученным данным напряженного состояния материала $\sigma_{1р}$ и $\sigma_{2р}$ рассчитывают критические значения прочности каменной соли — предельное сопротивление сдвигу $\tau_{пр} = 11$ МПа и угол внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$, при котором произошло разрушение (рис. 3).

ВЫВОДЫ

Разработан способ определения напряженного состояния геоматериалов, основанный на взаимосвязи между шероховатостью поверхности магистральной трещины разрушения Rz и напряжениями σ_n , действующими в этой зоне. Данный метод позволяет достаточно надежно оценить напряженное состояние геоматериалов в тех элементах, в которых фиксируется магистральная трещина разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оливер Д. Экспериментальная механика. Кн. 2 / под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — 552 с.
2. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. — М.: Физматгиз, 1963. — 252 с.
3. Amitrano D. Variability in the power-law distributions of rupture events, Eur. Phys. J. Special Topics, 2012, Vol. 205, No. 1. — P. 199–215.
4. Lei X., Satoh T. Indicators of critical point to rock failure inferred from pre-failure damage, Tectonophys., 2007, Vol. 431, No. 1–4. — P. 97–111.
5. Середин В. В. Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9. — Ч. 12. — С. 2713–2717.
6. Seredin V. V., Leibovich L. O., Pushkareva M. V., Kopylov I. S., Khrulev A. S. Evolution of fracture surface morphology in rock, Journal in Mining Science, Vol. 49, Issue 3. — P. 409–412.
7. Косых В. П. Закономерности распределения скачков смещений при срезе сыпучих материалов в стесненных условиях // ФТПРПИ. — 2010. — № 3. — С. 23–30.
8. Бобряков А. П. О механизме прерывистого скольжения в сыпучей среде // ФТПРПИ. — 2010. — № 6. — С. 11–17.
9. Куксенко В. С., Махмудов Х. В., Мансуров В. А., Султанов У., Рустамова М. З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. — 2009. — № 4. — С. 55–59.
10. Ениколопян Н. С., Мхитарян А. А., Карагезян А. С. Сверхбыстрые реакции разложения в твердых телах под давлением // ДАН СССР. — 1986. — Т. 288. — № 3. — С. 657–660.
11. Чиков Б. М., Каргаполов С. А., Ушаков Г. Д. Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. — 1989. — № 6. — С. 75–80.
12. 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. — С. 89–97.
13. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов Ю. В., Шутилов Р. А., Ковчанцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. В., Грнев И. В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 3–30.
14. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001. — 343 с.