

УДК 622.831

Г.Я. Воронков

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА МЕХАНИЗМ ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИ МАССИВА

Рассмотрены особенности механизма разупрочнения части горного массива под влиянием среды в условиях напряженного состояния.

Ключевые слова: прочность, порода, массив, механика, напряженное состояние, среда, трещина, разрушение.

Влияние прочности, наряду с горно-геологическими условиями (неоднородность горного массива, блочность, пористость, слоистость и пр.) и силой тяжести, является едва ли не самым важным предметом исследования в современной механике горных пород [1]. При этом прочность хрупких твердых тел характеризуется одним предельным состоянием, соответствующим переходу от упругой деформации к разрушению, а прочность пластических твердых тел — двумя предельными состояниями, соответствующими переходу от упругой деформации к пластической и переходу от пластической деформации к разрыву.

В условиях небольших глубин, а также для однородных горных пород в объемах, меньших структурных блоков, на которые разбит горный массив системами трещин, вид напряженного состояния не оказывает существенного влияния. Для больших глубин, трещиноватых и слоистых массивов в объемах, больше структурного блока, вид напряженного состояния необходимо учитывать [2]. В породах, особенно в поверхностных слоях отдельностей, имеются микротрещины различных размеров и ориентации, на краях которых под воздействием приложенных сил воз-

никают перенапряжения, превосходящие среднее напряжение в сечении отдельности. Если величина перенапряжения у вершины наиболее опасной трещины равна теоретической прочности материала, происходит катастрофический рост трещины и отдельность разрушается [1]. В связи с этим ранее было отмечено [3], что дефектность горных пород, а именно пустотность — трещины, каверны, слоистость, плоскости ослабления, пористость и т.п., взаимосвязана с прочностью горных пород, т.е. характеризует количественную и качественную сторону динамики деформируемого массива или отдельности породы, а не только служит чисто относительной величиной.

Из вышеупомянутого следует, что поведение части массива будет зависеть не только от структурных параметров пород (трещиноватости, пористости), физико-механических (прочности и деформируемости) характеристик породы, но и от вида напряженного состояния, в котором находится отдельность породы, а также от физико-химического воздействия среды, от кинетики и степени разупрочнения пород под действием среды.

Прочность пород в процессе разрушения может существенно изме-

ниться при изменении поверхностной энергии. Поверхностная энергия твердой фазы понижается на границе с жидкой средой, обеспечивающей более или менее полную компенсацию обнаженных на поверхности связей адсорбирующимися из раствора инородными атомами или молекулами. Величина трещины, пустотности, от которой, как было отмечено, зависит прочность, представляет доступную поверхность для изменения поверхностной энергии материала при взаимодействии со средой. Таким образом, чем больше изменяется поверхностная энергия, и чем выше пористость материала, тем более эффективно может быть снижена его прочность. Модуль же упругости, также как и поверхностная энергия, являясь термодинамической характеристикой, в условиях компенсации обнаженных связей на поверхности твердого тела представляет собой объемную характеристику тела и практически не меняется при адсорбции посторонних атомов или молекул. В более сложных случаях пластического разрушения реальная работа образования новых поверхностей включает работу пластической деформации в районе трещины. Работа пластической деформации также резко снижается при значительном понижении поверхностной энергии — это и есть охрупчивание под влиянием поверхностно-активной среды [4].

Следует особо отметить, что участие среды в условиях напряженного состояния может существенно изменить условия протекания процесса трещинообразования и разрушения и их микрокартину. Инородные атомы участвуют в преодолении сил сцепления лишь в той мере, в какой количество трещин и геометрия трещины,

скорость развития трещины, а также состояние материала в тупиковой части трещины и термические флуктуации в этой тупиковой части позволяют инородным атомам «своевременно» туда проникать [5]. В этом и состоит кинетическое условие проявления эффекта — при больших скоростях механического разрушения эффект понижения прочности исчезает [5], так как миграция среды протекает со значительно меньшими скоростями, чем рост трещин при больших скоростях механического разрушения.

Приведенные исследования, а также результаты многочисленных опытов, например [4—7], показали, что для правильного понимания механизма адсорбционного влияния среды следует рассматривать две стадии процесса разрушения. Первая стадия — постепенное зарождение и развитие «равновесных» микротрещин, обусловленных дефектами структуры и неоднородностями деформации на основе локальной концентрации деформаций, напряженного состояния и снижения поверхностной энергии при действии среды. Вторая стадия — относительно быстрый рост трещин, утрачивающих равновесность, на все сечение отдельности и ее разрушение.

Рост трещин на первой стадии, контролируемый протеканием пластических деформаций и, следовательно, действием сдвиговых напряжений $\sigma_{сд}$, может быть приближенно описан соотношением

$$l_{тр} = k \cdot (\sigma_{сд}^2 \cdot L^2 / E \cdot \alpha_{эф}),$$

где: $l_{тр}$ — максимальная длина трещины в данных условиях; L — параметр структуры, в пределах которого идет формирование дислокационных микронеоднородностей (размер зерна);

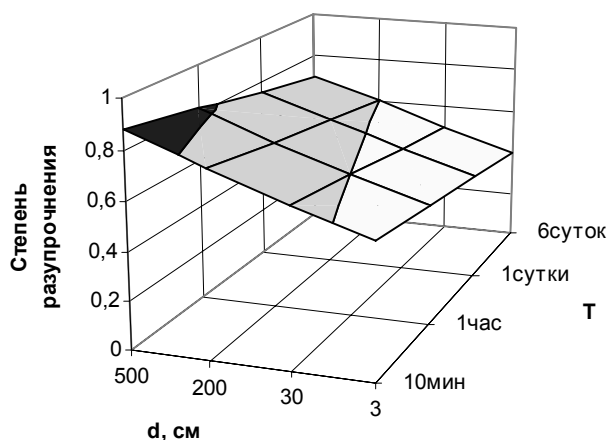


Рис. 1. Влияние времени обработки T отдельностей породы разной крупности d на степень разупрочнения

k — безразмерный коэффициент, характеризующий ту долю упругой энергии, накапливаемой в области формирующейся неоднородности, которая при развитии трещины реализуется как работа образования новой поверхности; E — модуль упругости; $\alpha_{эф}$ — эффективная поверхностная энергия включающая работу пластической деформации. В условиях хрупкого разрушения, точнее, при относительно малой величине пластической деформации, предшествующей разрушению, коэффициент k приближается по порядку величины к единице, тогда как при переходе от хрупкого к пластическому разрушению может падать до значений 10^{-3} . Из этого равенства следует, что трещина может развиваться, если увеличиваются сдвиговые напряжения $\sigma_{сд}$ при приложении нагрузки на отдельность, или, если при физико-химическом воздействии снизится поверхностная энергия твердого тела $\alpha_{эф}$.

Из приведенного уравнения также следует, что снижение поверхностной энергии при воздействии среды при-

ведет к прорастанию трещины в существующих условиях напряжения. При этом трещина будет расти, пока не установится новое равновесное состояние, соответствующее новой величине эффективной поверхностной энергии. В результате это приведет к тому, что прочность породы будет снижаться.

На рис. 1 на примере крупнозернистого песчаника (прочность на сжатие 110 МПа) показано как влияет время обработки растворами поверхностно-активных веществ отдельностей породы различного размера на степень разупрочнения. Видно, что для достижения оптимального разупрочнения время обработки увеличивается с увеличением размера куска. Аналогичные осредненные данные с точностью ± 15 — 20 % могут быть получены и для других пород.

Прямые опыты показали, что ненагруженная порода (песчаник, исходная прочность на сжатие 66 МПа) при действии поверхностно-активной среды через определенное время снижает прочность на 30 %, а порода, подверженная статическому изгибающему нагружению, при действии поверхностно-активной среды через такое же время снижает прочность более чем на 50 %.

Многочисленными экспериментами показано [8], что разрушение при циклическом и длительном статическом нагружении наступает при напряжениях, меньших, чем стандартная прочность, в связи с постепенным ростом трещин в процессе циклической или длительной нагрузки даже при отсутствии поверхностно-

активной среды. Поэтому для сухой необработанной поверхностно-активной средой породы сопротивляемость нагруженных образцов распространению трещин во времени также уменьшается. При этом отмечено, что в течение года в лабораторных условиях эффективная поверхностная энергия для нагруженного песчаника (прочность на сжатие 110 МПа) снижается с 23 до 12 Дж/м² [9]. Здесь уместно упомянуть, что данный механизм имеет определяющее значение в постепенном разрушении горных пород, разрушении и утрате античных и др. архитектурных сооружений и строений. При протекании метаморфических процессов, когда имеет место взаимодействие материала элементов строительных конструкций или полиминеральных горных пород находящихся, как правило, в том или ином механически напряженном состоянии, с различными жидкими средами: атмосферными осадками, поверхностными водными растворами, гидротермами, магматическими расплавами и пр., процесс разрушения протекает значительно интенсивнее [10].

При воздействии напряженного состояния в условиях обобщенного сдвига при воздействии адсорбционно-активных растворов процессы увеличения влажности породы и образования микроразрушений начинают развиваться одновременно. Но на

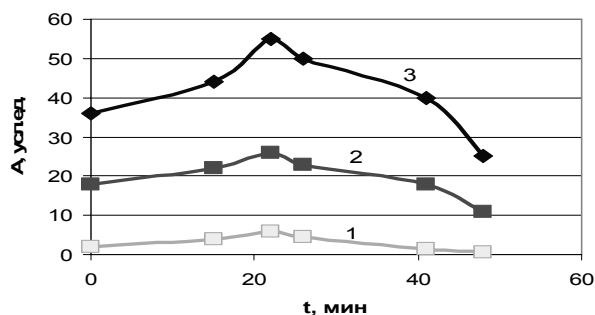


Рис. 2. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала A в породе во времени t при действии растворов ПАВ в условиях обобщенного сдвига (1, 2, 3 — соответственно 10 , 10^3 и 10^6 Дж/м³).

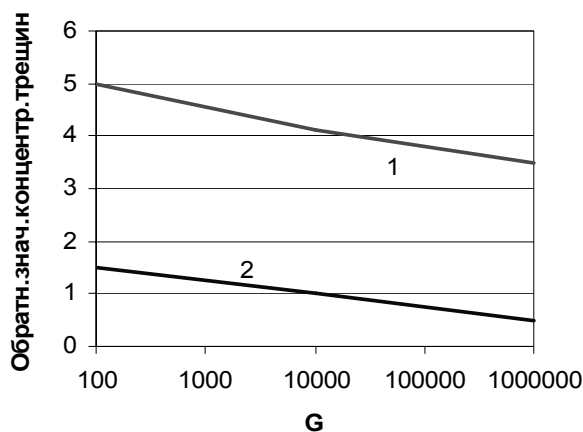


Рис. 3. Изменения обратного значения концентрации трещин $1/2N_{tr}^2$ в породе при действии воды (1) и поверхностно-активного раствора (2) от энергии деформирования G (Дж/м²) в условиях обобщенного сдвига

начальной стадии преобладает процесс увеличения влажности за счет заполнения объема пор, а на конечной — усиливается процесс образования микроразрушений. Это подтверждается ультразвуковым контролем образцов, находящихся в условиях сложного напряженного состояния и подвергнутых действию раствора ПАВ [11]. На рис. 2 приведены данные об изменении во времени амплитуды ультразвукового сигнала.

Увеличение амплитуды в начале процесса свидетельствует о постепенном заполнении объема пор, а по достижению максимума начинает превалировать процесс микротрещинообразования, приводящий к снижению амплитуды ультразвукового сигнала в связи с ростом трещин и соответствующим образованием пустот. Интенсивность процессов снижения прочности растет с увеличением энергии деформирования. Скорость трещинообразования контролируется скоростью миграции раствора по стенкам образующихся трещин и скоростью капиллярного впитывания раствора в микротрещины, которая не превышает 1—5 мм/мин.

Наступление второй стадии — собственно разрушения может быть описано по схеме Гриффитса как превращение трещины длиной $l_{тр}$ в неравновесное состояние, когда растягивающее напряжение σ достигает критического значения $\sigma \sim (\alpha_{эф} \cdot E / l_{тр})^{0.5}$. Это означает, что снижение поверхностной энергии $\alpha_{эф}$ благодаря смачиванию поверхностно-активной средой внутренней поверхности пор и стенок зародышевой трещины повлечет к уменьшению напряжения разрушения σ , приводящего к лавинному развитию имеющегося дефекта — узкой зародышевой трещины размером $l_{тр}$.

Повышение напряжений приводит к росту и развитию новых трещин. На рис. 3 представлены экспериментальные данные по изменению концен-

трации трещин, образующихся на поверхности породы после создания напряженного состояния и воздействия воды и поверхностно-активного раствора в течение часа.

Концентрацию трещин оценивали по параметру $N_{тр}^2$ [12], где N — число трещин на единице поверхности, $l_{тр}$ — средняя длина трещин в мм. Сравнение выборочных значений длин трещин показало, что вероятность их различия составляла для различных групп выборок 087—090 (вероятность совпадения 010—013). Это указывает на то, что расхождение между средними значениями длин развивающихся трещин в отдельных случаях следует считать существенными, и это позволяет рассматривать зависимость разрушения от энергии деформирования и влияния различных сред достоверной. Вид объемного напряженного состояния оценивался по значению параметра Надаи-Лоде. Работа деформирования единичного объема для части образца, примыкающей к свободной поверхности, определялась исходя их значений главных напряжений, модуля Юнга и отношения Пуассона.

Показано, что увеличение степени трещиноватости при действии среды — разупрочняющих растворов ПАВ в условиях обобщенного растяжения и сдвига снижает коэффициент структурного ослабления. В условиях всестороннего сжатия ослабляющее влияние трещиноватости уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шемякин Е.И. Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глу-

боких месторождений руды и угля // ФТПРПИ.— 1974.— № 6.— С. 29—45.

2. *Протодряконов М.М., Чирков С.Е.* Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. — М.: Наука, 1964. — 66 с.
3. *Шемякин Е.И.* О «хрупком» разрушении твердых тел. // Изв. АН, МТТ, 1997. — № 2. — С. 18—27.
4. *Ребиндер П.А., Шукин Е.Д.* Поверхностные явления в твердых телах в процессе их деформации и разрушения // Успехи физических наук. — М., 1972 — т. 108, вып. 1, С. 3—41.
5. *Шукин Е.Д.* Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды // Физико-химическая механика материалов. — М.: 1976. т. 12, № 1. — С. 3—20.
6. *Воронков Г.Я., Маршинкевич Г.И.* Роль электроповерхностных и адсорбционных свойств угля и пород в проявлении эффекта Ребиндера // ФТПРПИ. — 1990. — № 1. — С. 109—112.
7. *Шукин Е.Д.* Влияние поверхностно-активных веществ на механические свойства твердых тел. // в кн. Физическая химия. Современные проблемы. — М.: 1983. — С. 6—45.
8. *Мохначев М.П.* Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.
9. *Алексеев А.Д.* Эффективная поверхностная энергия горных пород и поверхностно-активные среды // Респ. межведомст. сб. «Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем». — Киев. 1981. вып. 13. — С. 65—71.
10. *Перцов А.В.* Жидкие межзеренные прослойки в геологических процессах // Сб. Математическое и физическое моделирование рудообразующих процессов. — М.: 1978. С. 43—55.
11. *Воронков Г.Я., Кусов Н.Ф., Маршинкевич Г.И.* Влияние сложного напряженного состояния на проявление поверхностных явлений в твердых телах // Респ. межведомст. сб. «Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем». — Киев. 1986. вып. 18. — С. 46—51.
12. *Ребиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. — М.: Наука, 1979. — 382 с.
13. *Салганик Р.Л.* Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН МТТ, 1973. — № 4. — С. 45—53. **ПАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Воронков Георгий Яковлевич — ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, старший научный сотрудник, igd@igds.ru, Национальный научный центр горного производства — Институт горного дела им. А.А. Скочинского.



ГОРНАЯ КНИГА



Дисперсное золото: геологический и технологический аспекты

А.Г. Секисов, Н.В. Зыков, В.С. Королёв

Год: 2012

Страниц: 224

ISBN: 978-5-98672-314-3

UDK: 622.34+550.4

Приведены результаты исследований плазмохимических, фотохимических и электрохимических процессов воздействия на минеральные матрицы при извлечении дисперсного золота во взаимосвязи с минералогическими и геолого-технологическими особенностями руд. Представлен анализ перспективных отечественных и зарубежных технических решений в области аналитических методов определения содержания дисперсного золота в пробах, изложены технологические особенности БВР и управление качеством золотосодержащих руд и технологий их переработки.