

2. Назимко В.В., Захаров В.С. Оценка напряженно-деформированного состояния толщи при произвольном порядке и очередности отработки запасов в свите пластов // Уголь Украины, 2001. — № 8. — С. 21–23.

3. Назимко В.В., Захаров В.С. Методика расчета конвергенции на контуре подготовительной выработки, основанная на принципе эквивалентной геомеханической ситуации // Геотехническая механика, 2001. — № 26. — С 53–59.

4. Назимко В.В., Вишневецкий В.В., Грядущий Ю.Б., Бугара М.И. Критерий устойчивости пород кровли в очистном забое // Уголь Украины, 1996. — № 8. — С. 20–22.

© Захаров В.С., Пастернак З.Г., 2002

УДК 622.831

КРАСЬКО Н.И. (Департамента угля Минтопэнерго Украины)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ ПОРОД НА РАСТЯЖЕНИЕ ОТ ВРЕМЕНИ ИХ НАГРУЖЕНИЯ**

Многие процессы разведки, добычи и переработки полезных ископаемых определяются прежде всего прочностью горных пород. Однако сама прочность не является константой и зависит от скорости нагружения образца или участка массива горных пород. При эксплуатации подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ скорость нагружения примыкающих к выработке пород нулевая, и для оценки устойчивости такой выработки необходим длительный предел прочности вмещающих пород, который имеет минимальное значение из всех возможных. При поддержании подготовительной выработки в зоне активного воздействия опорного давления приближающейся лавы необходим предел прочности, который бы характеризовался временем нагружения породы порядка нескольких недель. В процессе обрушения пород кровли по мере подвигания очистного забоя необходим предел прочности, отвечающий условиям нагружения в течение нескольких суток. Заметим, что указанные величины пределов прочности меньше стандартного предела прочности, получаемого кратковременным нагружением образца на обычном испытательном прессе. Однако при рассмотрении процессов разрушения пород бурильным или ударным инструментом, резцами комбайна и т.п. необходим уже динамический предел прочности, который превышает стандартный. Еще выше будет предел прочности для характеристики взрывных процессов разрушения горных пород.

Согласно [1] можно считать, что при нагружении образца породы в течение 1000 часов достигается длительный предел прочности, который имеет минимальное значение из всех возможных величин. Обычно предел длительной прочности горных пород определяется из серии опытов на сжатие или изгиб. При изгибных нагрузках определяют предел прочности на растяжение. При заданной нагрузке на образец регистрируют время от начала его нагружения до момента разрушения. Исходя из разных уровней нагрузки и времени разрушения образца, строят кривую длительной прочности в координатах «время разрушения — предел прочности».

На рис. 1 длительный предел прочности на сжатие алевролита имеет типичную логарифмическую затухающую зависимость от времени и составляет 0,67 от условно мгновенного. Поэтому обычно рекомендуют строить зависимость прочности от времени разрушения образца в полулогарифмических координатах. Обычно условно мгновенный предел прочности определяют при скорости нагружения образца порядка 0,1–1 МПа/с и с этой величиной сравнивают опыты по определению прочности при очень малых скоростях нагружения (длительной прочности) или

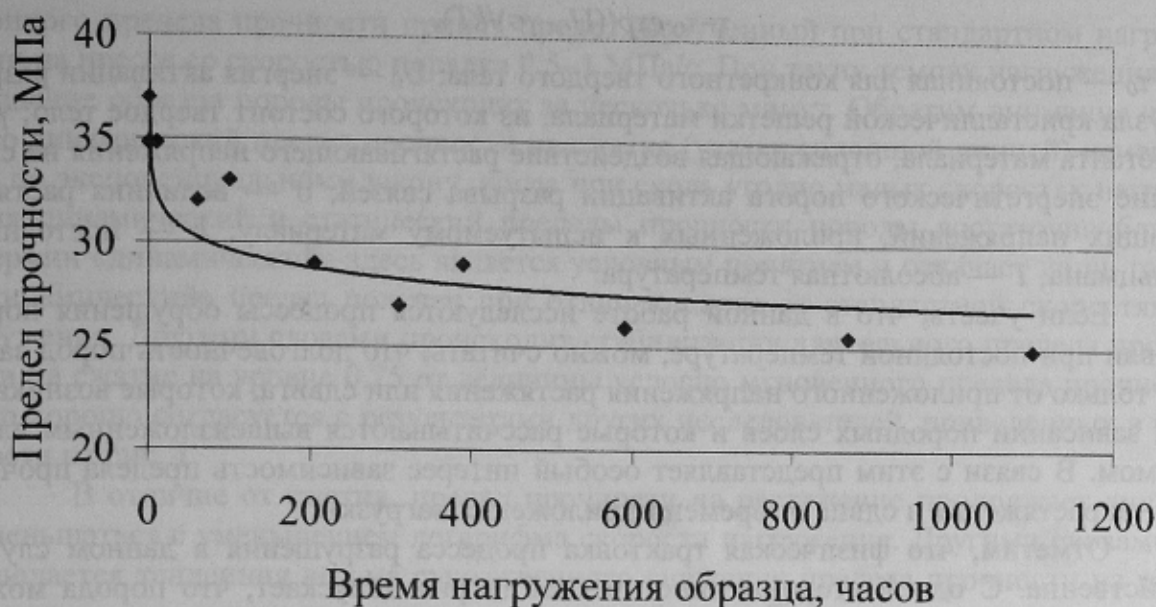


Рис. 1. Типичная кривая длительной прочности на сжатие [1]

очень больших (динамическая прочность). В табл. 1 даны примеры соотношения пределов.

Как видим, типичное отношение длительного предела прочности на сжатие к условно мгновенному или кратковременному для горных пород колеблется в диапазоне 0,5–0,8. При нахождении такого соотношения для пределов прочности на растяжение или сдвиг эта величина может быть меньше. Однако количество испытаний пород на длительный предел прочности на растяжение и сдвиг весьма скудно. Это объясняется трудоемкостью экспериментов и весьма большим разбросом самой величины предела прочности а также отношения длительного предела прочности к условно мгновенному или кратковременному. Кроме того, современные исследования показывают, что в многослойном массиве приведенный длительный предел прочности в 1,5–3 раза ниже средневзвешенного [2], что еще больше расширяет величину указанного соотношения.

Табл. 1. Соотношение длительной и условно мгновенной прочности пород на одноосное сжатие для разных пород [1]

Тип породы	Предел прочности при кратковременном нагружении, МПа	Длительный предел прочности, МПа	Отношение предела длительной прочности к кратковременной
Известняк	38	28	0,74
Песчаник	76	49	0,65
Каменная соль	20-35	14-220	0,6-0,75
Аргиллит	30-40	15-18	0,5-0,65
Алевролит	48	31	0,66

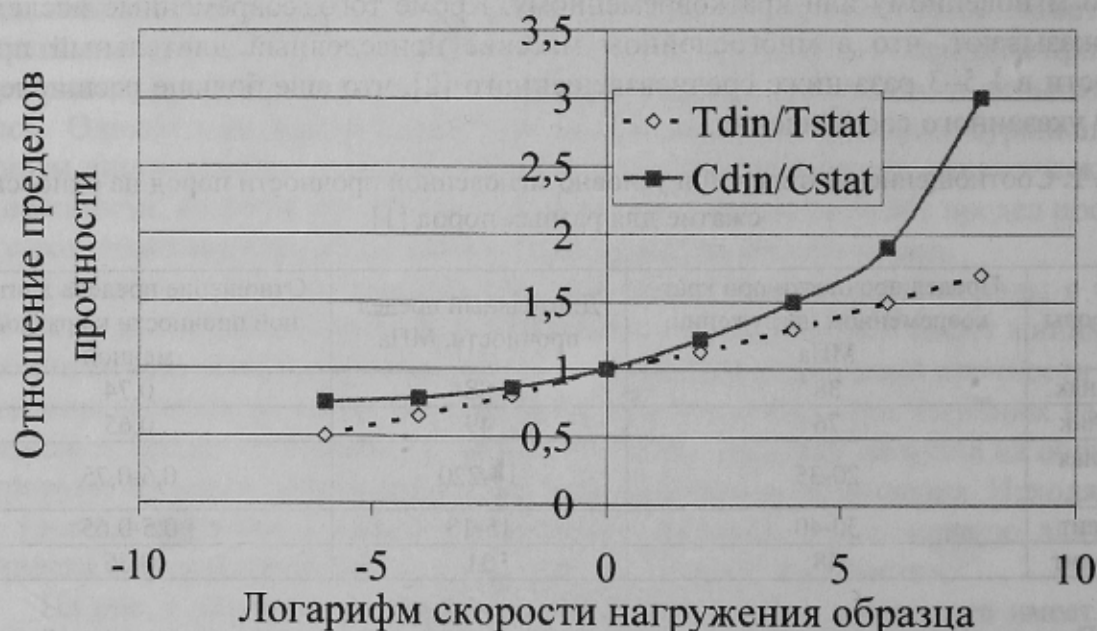
Весьма ценные результаты исследования прочности пород при разной скорости их нагружения в свое время выполнены Мохначевым М.П. и Присташем В.В. [3, 4]. Эти результаты ценны с методологической точки зрения потому, что авторы исходили из кинетической теории прочности твердых тел, выдвинутой проф. Журковым [4]. Основа теории долговечности твердого тела заложена в экспериментально подтвержденной физической зависимости времени  $t$  разрушения твердого тела от разрывных напряжений.

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp((U_0 - \gamma\sigma)/kT), \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — постоянная для конкретного твердого тела;  $U_0$  — энергия активации разрыва узла кристаллической решетки материала, из которого состоит твердое тело;  $\gamma$  — константа материала, отражающая воздействие растягивающего напряжения на снижение энергетического порога активации разрыва связей;  $\sigma$  — величина растягивающих напряжений, приложенных к испытываемому материалу;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Если учесть, что в данной работе исследуются процессы обрушения пород кровли при постоянной температуре, можно считать, что долговечность пород зависит только от приложенного напряжения растяжения или сдвига, которые возникают при зависании породных слоев и которые рассчитываются вышеизложенным алгоритмом. В связи с этим представляет особый интерес зависимость предела прочности на растяжение и сдвиг от времени приложения нагрузки.

Отметим, что физическая трактовка процесса разрушения в данном случае двойственна. С одной стороны кинетическая теория допускает, что порода может разрушиться при весьма широком диапазоне нагрузок, который изменяется на порядок и более. Во многих практических приложениях важна долговечность породы, а не ее предел прочности. Поэтому часто строительные или другие конструкции рассчитывают на долговечность, а не на прочность. С другой стороны в широком классе задач геомеханики важно знать предел прочности пород при заданной скорости нагружения, которая в данном случае зависит от скорости подвигания очистного забоя. Таким образом представляет практический интерес и обратная задача определения величины предела прочности, которая меняется от темпов подвигания лавы. Несмотря на скудность опубликованных результатов таких исследований, можно обнаружить весьма полезные данные, например в [3].



**Рис. 2.** Изменение соотношения динамического и статического предела прочности при разной скорости нагружения образца

На рис. 2 показана зависимость соотношения динамического и статического пределов прочности для горной породы при разной скорости нагружения образцов, включая и весьма большие скорости, при которых происходит удар. В качестве эта-

лонного предела прочности принят предел, полученный при стандартном нагружении на прессе со скоростью порядка 0,5–1 МПа/с. При таких темпах нагружения разрушение образца породы происходит за несколько минут. Обратим внимание на то, что динамический предел прочности на сжатие (указан сплошной линией) изменяется по экспоненциальному закону, когда при сколь угодно малых скоростях нагружения динамический и статический пределы прочности породы достаточно близки. Термин «динамический» здесь является условным понятием и означает лишь то, что «динамический» предел получен при отличающихся от стандартной скоростях нагружения. Другими словами происходит стабилизация длительного предела прочности на сжатие на уровне 0,75 от величины условно мгновенного предела прочности, что хорошо согласуется с результатами других исследователей, приведенных в частности на рис. 1.

В отличие от сжатия, предел прочности на растяжение продолжает линейно уменьшаться с уменьшением логарифма скорости нагружения. Другими словами наблюдается тенденция весьма существенного снижения предела прочности на растяжение с увеличением времени нагружения образца. Это означает, что при существующем на сегодня диапазоне скоростей подвигания очистных забоев, который можно принять порядка 20–200 м/мес., предел прочности пород кровли на растяжение может изменяться весьма существенно.

То же самое можно сказать и о пределе прочности на сдвиг. На рис. 3 показаны результаты исследований влияния скорости нагружения на изменение параметров паспорта прочности горной породы: сцепления и угла внутреннего трения. Если угол внутреннего трения меняется незначительно, то сцепление, которое, как известно, является пределом прочности на чистый сдвиг, изменяется в 3 раза при увеличении скорости деформирования от 50 до 800 с<sup>-1</sup>.

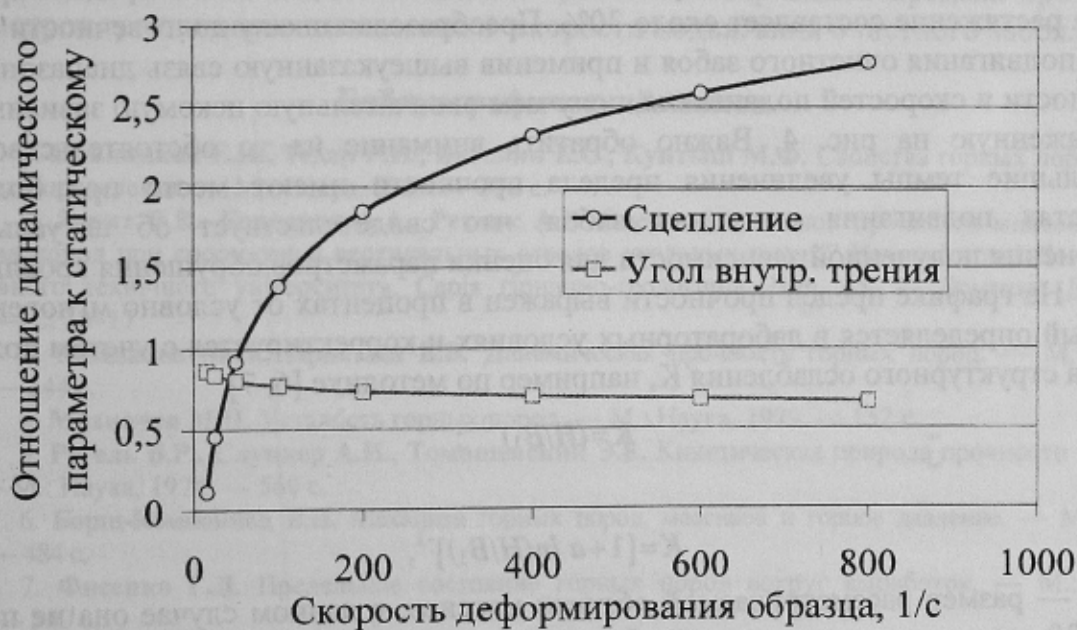


Рис. 3. Изменение соотношения прочностных параметров породы при увеличении скорости ее деформирования

Таким образом, ряд исследований выполненных независимыми группами ученых показывают, что длительный предел прочности пород на сжатие уменьшает-

ся по сравнению с условно мгновенным на 30–40%, а длительные пределы прочности на растяжение и сдвиг снижаются еще в большей степени.

Механизм такого различия заключается в следующем. Согласно теории Кулона-Мора, при сжатии разрушение породы происходит от сдвига. При этом, чем выше уровень сжатия на площадке сдвига, тем выше предел прочности на сдвиг. Трещины и другие дефекты безусловно ослабляют породу, однако даже при параллельной ориентации трещин площадке сдвига ослабляющий эффект весьма сильно компенсируется сжимающими напряжениями, которые всегда присутствуют на площадке при разрушении породы от действия сжимающей нагрузки. В случае чистого сдвига и тем более растяжения, ослабляющее действие трещин и дефектов сказывается в чистом виде и весьма существенно. Особенно этот ослабляющий эффект проявляется со временем, что вытекает из кинетической теории прочности твердого тела.

Линейная обратная связь между логарифмом долговечности твердого тела и его пределом прочности на растяжение установлена не только для горных пород, но и для широкого класса материалов: металлов, пластмасс. В источнике [5] приведены многочисленные графики такой зависимости для металлов, пластмасс, монокристаллов резины и других материалов, которые качественно аналогичны графику на рис. 2. Полученные результаты исследований являются основанием для вывода зависимости предела прочности пород кровли на растяжение от скорости выполнения технологического процесса по добыче угля. В частности, особую актуальность имеет задача прогноза периодических обрушений кровли очистного забоя в процессе его подвигания. Приняв, что длина призабойного пространства равняется примерно 5 м, получаем, что при скорости подвигания 200 м/мес толща пород кровли над очистным забоем будет находиться порядка 0,6–0,7 суток, или примерно 15 часов. При скорости подвигания 20 м/мес это время увеличивается до 150 часов. Растяжка такого временного диапазона на логарифмической шкале составит 2,2 единицы. На графике рис. 2 определяем, что во временном диапазоне 0–2,2 падение предела прочности на растяжение составляет около 30%. Преобразовав шкалу долговечности в скорость подвигания очистного забоя и применив вышеуказанную связь диапазона долговечности и скоростей подвигания, получаем окончательную искомую зависимость, изображенную на рис. 4. Важно обратить внимание на то обстоятельство, что наибольшие темпы увеличения предела прочности имеют место при больших скоростях подвигания очистного забоя, что свидетельствует об актуальности применения полученной зависимости для оценки параметров обрушения кровли.

На графике предел прочности выражен в процентах от условно мгновенного, который определяется в лабораторных условиях и корректируется с учетом коэффициента структурного ослабления  $K$ , например по методике [6, 7]:

$$K=(H/B_1)^{-0.6};$$

или

$$K=[1+a \ln(H/B_1)]^{-1},$$

где  $H$  — размер рассматриваемой области массива, в данном случае она не превышает 30 вынимаемых мощностей;  $B_1$  — блочность обрушенных пород;  $a=3-5$  для пород средней прочности с нормально секущей трещиноватостью.

Именно этот калибровочный график будет использоваться в дальнейшем при задании пределов прочности пород кровли в зависимости от темпов подвигания очи-

стного забоя. Оценка показывает, что диапазон значений корректировочных коэффициентов при переходе от образца к массиву составляет 2 порядка.

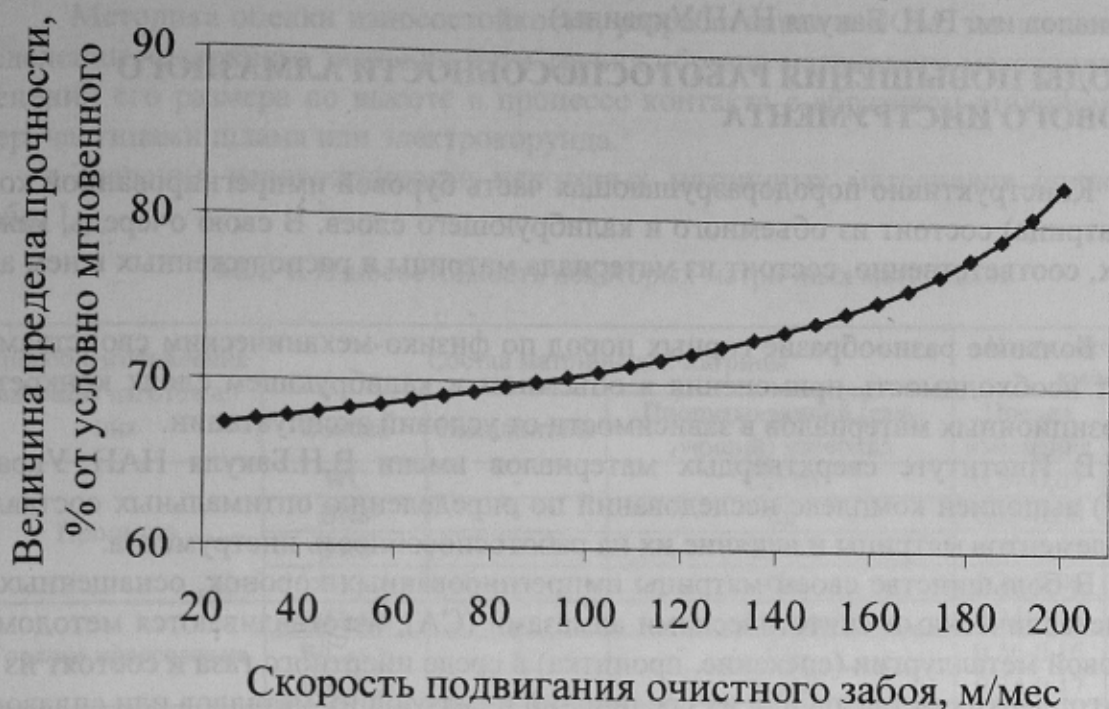


Рис. 4. Зависимость предела прочности пород кровли на растяжение от скорости подвигания очистного забоя

На основе анализа представительного числа горнотехнических ситуаций, перечисленных в начале статьи установлено, что приведенный предел прочности пород слоистой кровли на растяжение в массиве может изменяться в широком диапазоне от 0,03 МПа до 0,3–0,5 МПа, что обусловлено вариацией предела прочности, параметров трещиноватости массива и скорости подвигания очистного забоя.

#### Библиографический список

1. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969. — 392 с.
2. Левит В.В., Бородуля А.А., Резник А.В. Оценка длительной прочности многослойного массива пород при сооружении вертикальных стволов угольных шахт // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія гірнично-геологічна. Вип. 45. — Донецьк, ДонДТУ, 2002. — С. 13–17
3. Мохначев М.П., Присташ В.В. Динамическая прочность горных пород. — М.: Наука, 1982. — 144 с.
4. Мохначев М.П. Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
6. Борщ-Компониц В.И. Механика горных пород, массивов и горное давление. — М.: МГИ, 1969. — 484 с.
7. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. — М.: Недра, 1976. — 340 с.

© Красько Н.И., 2002