

УДК [622.023.23:539.4]:620.16

Скипочка С. И., д-р техн. наук, профессор,
Паламарчук Т. А., д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Яланский А.А., д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Бобро Н.Т., инженер,
Прохорец Л. В. мл. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Скіпочка С. І., д-р техн. наук, професор,
Паламарчук Т. А., д-р техн. наук, пров. наук. співроб.,
Яланський А.О., д-р техн. наук, пров. наук. співроб.,
Бобро Н.Т., інженер,
Прохорец Л. В., мол. наук. співроб.
(ІГТМ НАН України)

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Skipochka S.I., D.Sc. (Tech), Professor,
Palamarchuk T.A., D.Sc. (Tech), Senior Researcher,
Yalansky A.A., D.Sc. (Tech), Senior Researcher,
Bobro N.T., M.S. (Tech),
Prohorec L.V. M.S. (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)

HOW LOADING RATES INFLUENCE ON THE ROCK STRENGTH PROPERTIES

Аннотация. Предмет исследований – прочностные характеристики горных пород. Цель - исследование влияния скорости нагружения на прочностные свойства горных пород. Методы исследования – теоретические и экспериментальные исследования, анализ полученных результатов. На основании анализа экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в допредельной области напряжений с возрастанием скорости нагружения образцов горных пород их пределы прочности на сжатие увеличиваются по закону, близкому к логарифмическому, с асимптотическим приближением к определенному максимальному значению, выше которого влияние приращения скорости перестает сказываться на величине указанных параметров. Показано, что существенное влияние на предел прочности горных пород может оказывать неравнокомпонентное напряженное состояние, боковой или гидростатический подпор, температура и запредельные скорости деформирования, вызываемые динамическими напряжениями от обрушений пород или горных ударов и выбросов пород, угля и газа.

Ключевые слова: скорость нагружения, скорость деформирования, прочность горных пород, угленосный массив.

Известно, что одно из основных направлений интенсификации добычи полезных ископаемых, в частности, угля – повышение нагрузки на очистной забой. Поскольку горно-геологические условия угольных месторождений, а также добычное оборудование, которым оснащены все шахты Украины, не позволяют существенно увеличивать длину отрабатываемых лав, единственный путь повышения нагрузок – увеличение скорости подвигания фронта очистных работ. В этом случае, с точки зрения геомеханики массива горных пород, происходят два весьма значимых процесса.

Первый – смещение зоны опорного давления в сторону груди забоя лавы. Это связано с тем, что деформационные процессы в массиве не успевают релаксировать. Такое явление приводит к смещению указанной зона в сторону лавы и существенному изменению напряженного состояния краевой части угольного пласта, причем, не только в лаве и сопряжениях ее с выемочными штреками, но в участковых выработках на значительном удалении от сопряжения, т. к. зона влияния лавы может достигать 120 м и более [1].

Второй процесс (также обусловленный релаксационными эффектами) связан с возрастанием шага посадки основной кровли в отработанной части лавы. Экспериментально-теоретическими исследованиями доказано, что, например, для условий шахт Западного района Донбасса при возрастании скорости подвигания фронта очистных работ в три раза, шаг посадки увеличивается почти в два раза. Данное явление, кроме внесения существенных изменений в напряженно-деформированное состояние массива, значительно меняет параметры системы «массив – крепь очистного забоя», доводя их (в ряде случаев) до предельно допустимых [1]. Несмотря на то, что традиционно условием ритмичной работы механизированных комплексов считается высокая скорость подвигания лавы, известны случаи, например, на шахте им. Героев Космоса, когда увеличение нагрузки на очистной забой с 1000-1400 до 2000-2500 тонн в сутки приводило к посадке механизированной крепи «на жесткую» и даже ее опрокидыванию.

Из вышесказанного следует два вывода:

- для каждого типа горно-геологических условий, конкретного оборудования и параметров лавы существует оптимальная скорость подвигания фронта очистных работ;
- прочностные характеристики углей и вмещающих пород для шахт с высокими скоростями подвигания лав должны содержать поправочные на скорость деформирования коэффициенты, получаемые по результатам лабораторных испытаний на прессах с регулируемой скоростью нагружения.

Целью данной статьи является изучение влияния скорости нагружения на прочностные свойства горных пород.

Изучению характера изменения сопротивляемости твердого тела в зависимости от скорости приложения нагрузки посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [1-8].

Основной объем исследований релаксационных явлений посвящен изучению поведения пород при квазистатических нагружениях, а также

фиксированных деформациях. В то же время, отдельные динамические исследования позволили установить возрастание деформаций после начала разгрузки породы, а также зависимости деформационных характеристик и прочности от скорости нагружения. Показано, что релаксационные явления, как правило, связаны с вязкостью пород и их структурой. Принимая во внимание, что эффекты, обусловленные релаксационными явлениями, существенно зависят от интенсивности и неравномерности напряженного состояния, определяющего возникновение и развитие дилатансии, т. е. изменений в размерах тел, можно предположить, что второй механизм играет значительную роль в поведении массива при неравномерных динамических нагрузках.

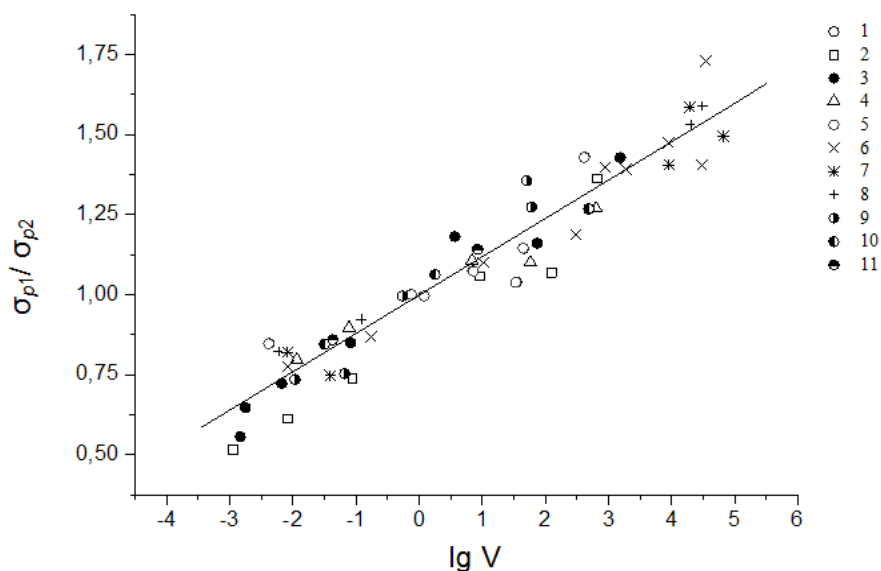
В последние десятилетия широкое распространение получила кинетическая теория прочности, в которой разрушение рассматривается как термофлуктуационный процесс, характеризующийся долговечностью. Большая часть исследователей отмечает возрастание сопротивления при разрушении образцов с увеличением скорости приложения нагрузки. В частности, показано, что отношение максимальных значений средних показателей прочности образцов при динамическом и статическом разрушении составляет: для известняков – 2,6, песчаников – 2,0.

Одним из первых значительное влияние скорости нагружения на механические свойства материалов обнаружил Дж. Гопкинсон [2]. При измерении прочности стальных проволок, внезапно растягиваемых падающим грузом, им было установлено, что минимальная высота, с которой необходимо бросать груз, чтобы вызвать разрыв проволоки, не зависит от массы груза, а определяется величиной скорости движения груза. Повторив эти опыты, Гопкинсон определил, что предел прочности при динамическом растяжении проволоки гораздо больше, чем при статических измерениях (описание указанных опытов можно найти в книге Г. Кольский [5]). Системное изучение влияния временной зависимости на прочность материалов было начато в 1952 г. работами С. Н. Журкова с сотрудниками [9].

Большое количество результатов экспериментов по влиянию скорости нагружения на прочностные и деформационные характеристики различных горных пород в условиях одноосных испытаний содержится в работах [7,10,11]. На рис. 1 для иллюстрации приведена обобщенная зависимость предела прочности на растяжение при изменении скорости нагружения V от 10^{-5} МПа/с до $2 \cdot 10^8$ МПа/с (диапазон изменения скоростей относительных деформаций составляет соответственно от 10^{-9} с⁻¹ до $2 \cdot 10^3$ с⁻¹), показывающие, что при увеличении скорости нагрузки прочность исследованных пород возрастает. При этом прочность на отрыв растет линейно с увеличением $\lg V$ во всем диапазоне изменения скорости нагружения.

Влияние скорости деформирования на предел прочности образцов для углевмещающих пород различного типа можно проследить в табл.1. Как правило, с возрастанием скорости деформирования увеличивается предел прочности. Исключение составляют породы, которые сложены различающимися по размеру зернами или минералами с весьма различными

свойствами. В этих случаях на фоне общего повышения предела прочности с возрастанием скорости деформирования могут наблюдаться локальные минимумы. Относительные деформации в табл. 1 не приведены, так как они имеют сложный закон изменения. При некоторых скоростях деформирования, разных для испытанных пород, образцы становятся очень пластичными перед разрушением, но пластичность проявляется в очень узком диапазоне скоростей деформирования [12].



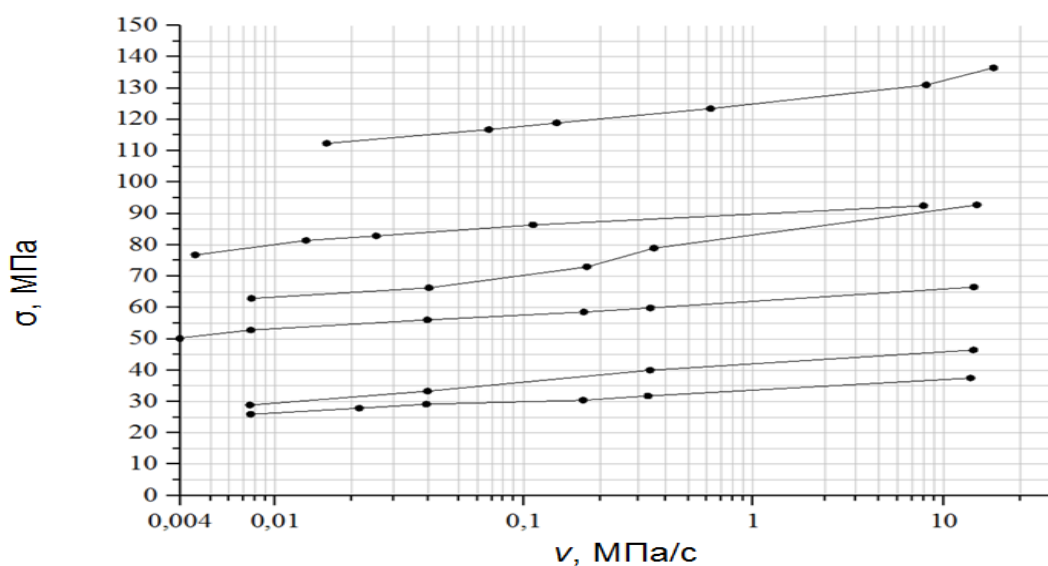
1, 7 – песчаник; 2, 9 – известняк; 3 – габбро; 4 – диабаз; 5 – оруденелый алевролит; 6 – бетон; 8 – мрамор; 10 – гранит; 11 – долерит; σ_{p1} – предел прочности на отрыв; σ_{p2} – то же при $V=0,1$ МПа/с;

Рисунок 1 – Обобщение зависимости предела прочности горных пород на растяжение при различных скоростях деформирования

Таблица 1 – Предел прочности σ_{ic} (МПа) горных пород при различных скоростях деформирования $\dot{\epsilon}$

Порода	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	$\sigma_2=\sigma_3$, МПа	σ_{ic} при $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹				
			10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	1
Песчаник красный сильнопористый	2,70	0,1	61	68	80	97	115
		50	-	236	236	280	320
		100	-	285	290	350	410
Песчаник кварцевый сильнопористый	-	0,1	68,6	81,4	93	104,6	117
		50	183,6	210,5	244	274,4	304,7
		100	245,3	290,7	331,4	372,1	424,4
Песчаник взрывоопасный среднепористый	-	0,1	92	95	99	100	102
		50	200	202	204	214	218
		100	250	254	258	266	270
		150	312	301	308	306	310
Песчаник кварц- полевошпатовый среднепористый	-	0,1	85	95	106	116	127
		50	200	202	204	206	208
		100	246	252	258	264	270
		150	312	301	308	306	320

Теоретическая зависимость прочности углевмещающих пород от логарифма скорости нагружения, представленная в работе [12], также выражается линейной зависимостью и представлена на рис. 2.



1 – уголь; 2 – глинистый сланец; 3 – песчанистый сланец;
4, 5 – мелкозернистый песчаник; 6 – среднезернистый песчаник

Рисунок 2 – Зависимость прочности углевмещающих пород σ от логарифма скорости нагружения V .

Прогноз поведения горных пород при изменении темпов очистных работ является необходимым элементом для разработки мероприятий по охране выработок и выбору средств крепления. В настоящее время нет единого мнения о том, какое влияние скорости проведения выработок на механические процессы, которые происходят в породном массиве. Гипотетически можно предположить, что при быстром обнажении пород в массиве происходят те же процессы, что и в образце горных пород при быстром приложении нагрузки на испытательном прессе. Поэтому многими исследовательскими коллективами изучался вопрос о влиянии скорости нагружения на процесс разрушения образцов в лабораторных условиях [7, 13-15]. В работе [13] выполнено обобщение известных результатов и предложена методика учета скорости проведения выработок при моделировании геомеханических процессов.

Были выполнены исследования по определению зависимости прочности и деформации пород угольных формаций от скорости нагружения. Всего было испытано 22 пробы, представленные углями, разной степени метаморфизма и наиболее распространенными вмещающими породами.

Некоторые результаты пород приведены в табл. 2.

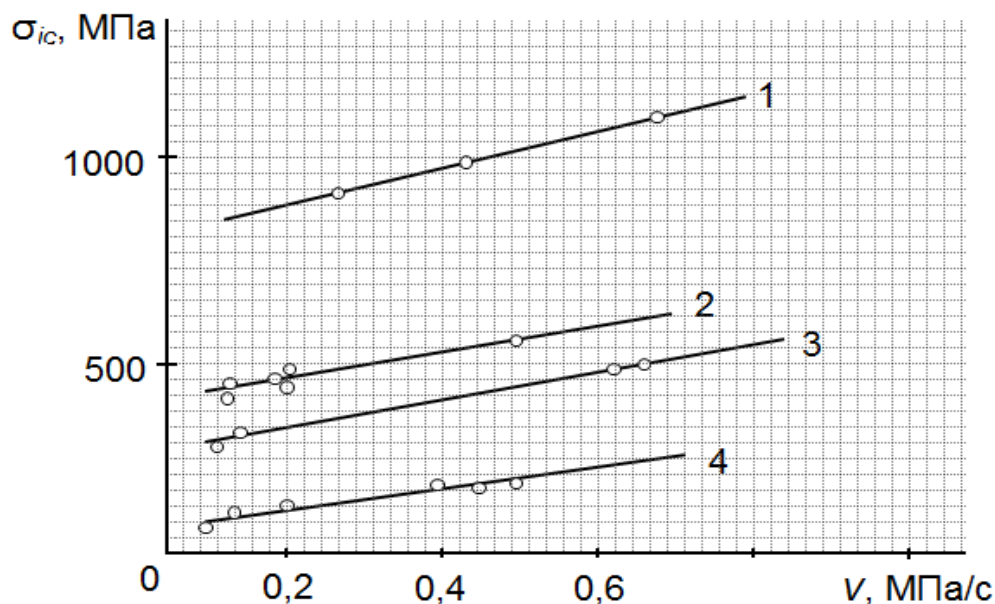
Простейшие расчеты, а также результаты шахтных экспериментальных исследований [16] показывают, что основные литотипы пород угольных формаций на глубинах 700-800 м и более испытывают горное давление, соизмеримое с их пределом прочности на одноосное сжатие и даже

существенно превышающее. Устойчивость массива на таких глубинах объясняется, с одной стороны, всесторонним сжатием пород, т. е. боковым их подпором, с другой, – наличием в материалах за пределом прочности так называемой «остаточной прочности».

Таблица 2 – Усредненные результаты влияния скорости нагружения пород на упругие и прочностные характеристики (шахта им. Героев Космоса)

Параметр	Скорость нагружения образца, МПа/с						
	0,01	0,1	0,3	0,5	1,0	5,0	10,0
Угли							
$\sigma_{сж}$, МПа	27,6	28,1	28,6	29,5	30,8	31,2	32,0
E , ГПа	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
Песчаники							
$\sigma_{сж}$, МПа	23,8	27,1	28,2	29,3	31,0	31,9	32,4
E , ГПа	13,6	14,1	14,6	14,8	14,9	15,1	15,2
Аргиллиты							
$\sigma_{сж}$, МПа	8,6	8,8	9,4	10,5	11,0	11,2	-
E , ГПа	7,2	7,5	7,7	7,8	8,2	8,4	-
Алевролиты							
$\sigma_{сж}$, МПа	16,7	16,8	17,4	17,8	18,3	18,7	18,9
E , ГПа	21,4	21,5	22,4	22,9	23,5	23,9	24,1

Характер изменения предела прочности σ_{ic} в зависимости от скорости нагружения V и бокового (объемного) подпора для гранита приведен на рис. 3. Для ряда горных пород с уменьшением скорости падает и предел прочности σ_{ic} .



1 – $\sigma_2 = 350$ МПа; 2 – $\sigma_2 = 150$ МПа; 3 – $\sigma_2 = 100$ МПа; 4 – $\sigma_2 = 0,1$ МПа

Рисунок 3 – Зависимость прочности образцов гранита от скорости нагружения V при испытаниях в условиях различных боковых давлений ($\sigma_2 = \sigma_3$)

Экспериментальные исследования временной зависимости прочности горных пород проводятся в основном при постоянной скорости деформирования $\dot{\epsilon}$. Если через ϵ_0 обозначить деформацию образца перед разрушением, то при условии постоянства скорости деформирования она может быть выражена как $\dot{\epsilon} = \epsilon_0 / \tau$, где τ – время испытаний. Используя τ , получим, что при постоянных температуре испытаний и деформациях прочность материала σ должна быть пропорциональной логарифму скорости деформирования, т. е. $\sigma \sim \lg \dot{\epsilon}$ (такой же результат получается и при условии постоянства скорости приложения нагрузки).

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где τ_0 , γ – коэффициенты, характеризующие прочностные свойства твердого тела; U_0 – внутренняя энергия; k – постоянная Больцмана; T – температура.

С этих позиций исследование влияния скорости деформирования на прочность горных пород дано в работе [6]. Изучалась прочность белого мрамора, нескольких видов песчаников, диабаз и других горных пород в зависимости от вида напряженного состояния (опыты с боковым подпором) и скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1$, которая изменялась в пределах двенадцати десятичных порядков. Образцы испытывались на осевое сжатие напряжением σ_1 , при наличии разных величин гидростатического давления $\sigma_2 = p$. Некоторые результаты этих исследований для мрамора и песчаника, представленные на рис. 4, дают представление о характере временной зависимости прочности горных пород.

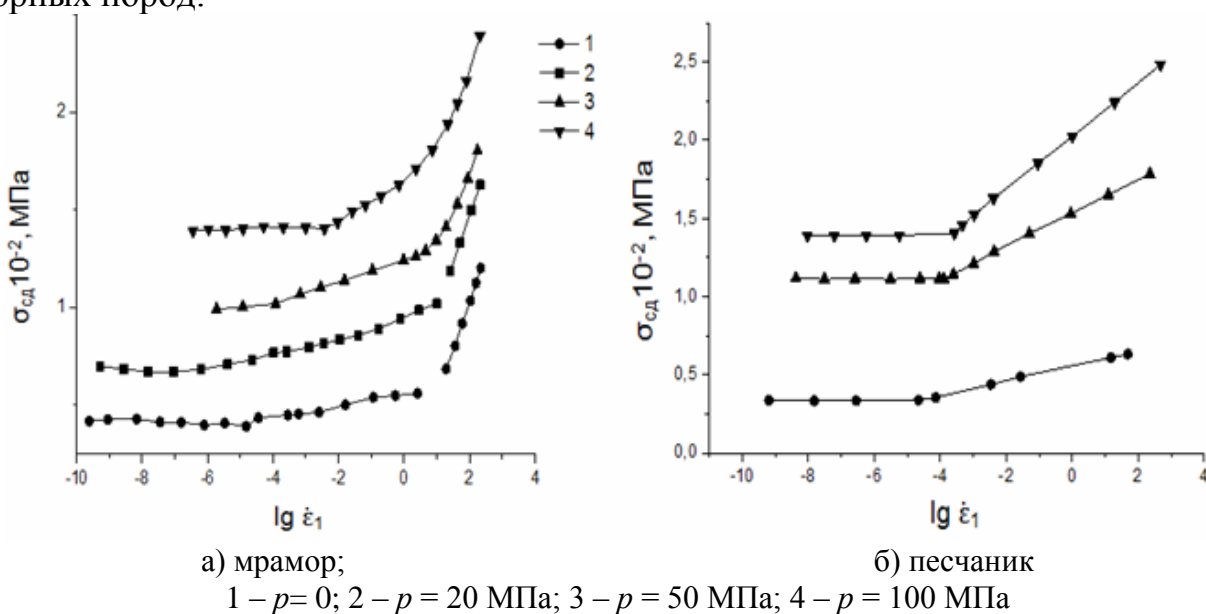


Рисунок 4 – Влияние скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1$ на сдвиговую прочность $\sigma_{сд}$ для различных материалов при разных величинах гидростатического давления p

В частности видно, что в области малых скоростей ($\dot{\epsilon}_1 < 10^{-4} \text{с}^{-1}$) прочность исследованных пород не зависит от скорости деформирования, а значит и от

времени.

Не обсуждая этот результат, отметим только, что подобное положение отмечалось и для ряда твердых материалов, не являющихся горными породами [17]. Однако наиболее интересным и важным является то, что при $\dot{\varepsilon}_1 > 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ для всех исследованных материалов прослеживается тенденция к росту прочности с увеличением скорости деформирования $\dot{\varepsilon}_1$ по логарифмическому закону [6]

$$\sigma_{\text{сд}} = \frac{1}{2\alpha} \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \exp(Ac), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{сд}}$ величина сдвиговой прочности; α , $\dot{\varepsilon}_0$, A – константы материала; $C = \sigma_2/\sigma_1$ – параметр, характеризующий напряженное состояние.

При $\dot{\varepsilon}_1 > 10 \text{ с}^{-1}$ у мрамора обнаруживается участок более сильной зависимости от $\lg \dot{\varepsilon}_1$. Т. е., зависимость прочности от скорости деформирования, описываемая в координатах $\sigma_{\text{сд}} - \lg \dot{\varepsilon}_1$ прямой линией, при $\dot{\varepsilon}_1 = 10 \text{ с}^{-1}$ имеет излом. Аналогичная ситуация часто отмечается и у твердых материалов, не относящихся к горным породам, и связывается со сложностью их строения или структуры.

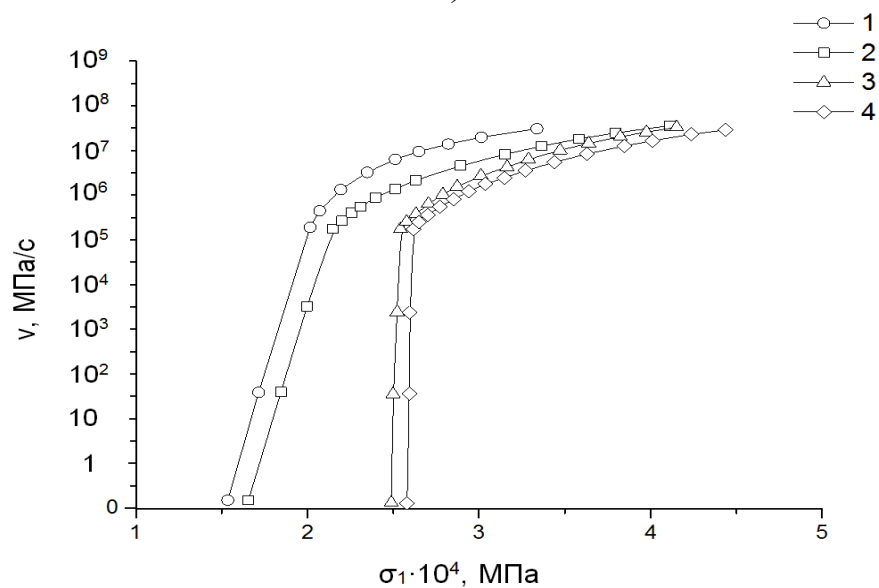
В среднем увеличение прочности в области ее зависимости от $\dot{\varepsilon}$ при изменении последней от 10^{-4} с^{-1} до 10^2 с^{-1} составляет около 1,5-2,0 раз по сравнению с минимальным значением, т. е. приращение прочности, соответствующее изменению скорости деформирования на порядок, равно примерно 10-20 %.

Результаты измерения остаточных деформаций позволяют проследить за необратимой объемной деформацией мрамора и песчаника перед наступлением разрушения. Общим для этих горных пород является наличие минимума этих деформаций в диапазоне $\dot{\varepsilon}_1 = (10^{-5} - 10^{-3}) \text{ с}^{-1}$. При $\dot{\varepsilon}_1 < 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ вплоть до минимальных исследованных значений $\dot{\varepsilon}_1 = 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ наблюдается повышение пластичности. При увеличении скоростей деформирования от 10^{-3} с^{-1} пластичность опять возрастает. У мрамора в диапазоне $\dot{\varepsilon}_1 = (10^{-1} - 10) \text{ с}^{-1}$ наблюдается максимум необратимых деформаций объема. При $\dot{\varepsilon}_1 > 10 \text{ с}^{-1}$ объемные деформации начинают спадать. Наличие максимума в области высоких скоростей деформирования является результатом, расходящимся с общепринятым представлением о переходе от пластического к хрупкому разрушению при возрастании скорости нагружения.

Данные [18] по прочностным испытаниям гранита и базальта при различных скоростях деформирования, приведенные на рис.5, подтверждают линейную зависимость прочности от $\lg \dot{\varepsilon}$. Однако, так же, как и результаты других исследований, показывают, что при больших значениях скорости деформирования ($\dot{\varepsilon} > 1 \text{ с}^{-1}$) рост прочности с изменением $\dot{\varepsilon}$ становится более сильным.

Эта тенденция прослеживается в широком диапазоне изменения температуры испытаний (при комнатной температуре средняя относительная скорость роста прочности на порядок меньше изменения скорости

деформирования и составляет около 10 %).



1 – базальт, $T = 296$ К; 2 – гранит, $T = 296$ К; 3 – базальт, $T = 77$ К;
4 – гранит, $T = 77$ К

Рисунок 5 – Прочность σ_1 гранита и базальта в зависимости от температуры испытания и скорости нагружения

Зависимость прочности от скорости деформирования ($10^{-4} \text{ с}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^3 \text{ с}^{-1}$) и температуры испытаний ($80 \text{ К} < T < 1400 \text{ К}$) для мелкокристаллического базальта исследовали в работе [19]. Обработка экспериментальных данных с привлечением кинетической теории прочности показала, что прочность базальта при сжатии и растяжении с боковым подпором, величина которого варьировалась в пределах от 0 до 700 МПа, достаточно хорошо описывается зависимостью логарифмического вида.

Выводы. Таким образом, экспериментальными и теоретическими исследованиями установлена тесная корреляционная связь между прочностными свойствами широкого класса горных пород, в том числе и углевмещающих, от скорости нагружения. Установлено, что в допредельной области напряжений с возрастанием скорости нагружения образцов горных пород предел прочности на сжатие и модуль упругости увеличиваются по близкому к логарифмическому закону с асимптотическим приближением к определенному максимальному значению, выше которого влияние приращения скорости перестает сказываться на величине указанных параметров. Однако существенное влияние на предел прочности горных пород может оказывать неравнокомпонентное напряженное состояние, боковой или гидростатический подпор, температура и запредельные скорости деформирования, вызываемые динамическими напряжениями от обрушений пород или горных ударов и выбросов пород, угля и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скипочка, С.И. Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав / С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.Ю. Куклин. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД»,

2006. – 248 с.

2. Николаевский, В.Н. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушение / В.Н. Николаевский, Л.Д. Лившиц, И.А. Сизов // Итоги науки техники ВИНТИ. Сер. «Механика деформируемого твердого тела». – 1978. – Т.11. – С. 123-250.

3. Структурная иерархия и механические свойства горных пород. Часть II. Структурная иерархия, размерный эффект и прочность / Чэнжи Ци [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 6. – С. 41-52.

4. Савушкин, А.Н. Влияние скорости нагружения на механические свойства жаропонижающих титановых сплавов / А.Н. Савушкин, О.С. Каспанов, С.А. Гольнец // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». – 2015. – №3.

5. Кольский, Г. Волны напряжений в твердых телах / Г. Кольский. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 192 с.

6. Ставрогин, А.Н. Экспериментальная физика и механика горных пород / А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов. – М.: Наука, 2001. – 343 с.

7. Иванов, А. Моделирование влияния скорости горных работ на прочность пород и устойчивость выработки / А. Иванов, Е. Сдвижкова, А. Шашенко // Gornictvoi Geoinzhneria. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 307-314.

8. Протосеня, А.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива в зоне влияния очистных работ / А.Г. Протосеня, К.Г. Синякин // Зап. Горн.ин-та. – 2011. – 189. – С. 240-243.

9. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. - №3. – С. 168-183.

10. Мохначев, М.П. Влияние скорости нагружения на прочностные и деформационные характеристики горных пород / М.П. Мохначев // Исслед. прочности и деформируемости горн.пород. – М.: Наука, 1973. – С. 40-80.

11. Влияние скорости нагружения на прочность керамических материалов на основе самосвязного карбида кремния / Г.В. Степанов [и др.] // Проблемы прочности. – 2010. -№ 3. – С. 79-88.

12. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник / Е.И. Баяк, И.С. Томашевская, В.М. Добрынин [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 255 с.

13. *Vacro Von M. Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit von Gesteinen/ Von M. Vacro, J. Mikeska/FreiburgerForschungshefte. – 1968. - № A448. – S. 45-63.*

14. Мансуров, В.А. Поведение горных пород при различных скоростях нагружения / В.А. Мансуров. – Фрунзе: Илим, 1982. – 84 с.

15. Зюков, Ю.Е. Влияние скорости подвигания очистного забоя на обрушение пород основной кровли в лавах / Ю.Е. Зюков // Уголь Украины. – 2007. – № 1. – С. 16-18.

16. Кулинич, В.С. Оценка напряженного состояния массива горных пород методом локального гидравлического разрыва / В.С. Кулинич // Управление состоянием предельно напряженных пород. – Киев, Наук. думка, 1992. – С. 55-63.

17. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевская. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

18. *Kumar A. The effect of stress rate and temperature on strength of basalt and granite / A. Kumar // Geophysics. - 1968. – 33, №3. – P. 501-510.*

19. *Lindholm U.S. The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt / U.S. Lindholm, L.M. Yeakley, A. Nagy // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. Abstr. – 1974. – 11, №5. – P. 181-191.*

REFERENCES

1. Skipochka S.I., Usachenko B.M. and Kuklin V. Yu. (2006), *Elementy gemechaniki ugleporodnogo masiva pri vysokih skorostyah podviganiya lav* [Elements of geomechanics coal rock mass at high advance rates of lava], PE "Lira Ltd", Dnepropetrovsk, Ukraine.

2. Nicholaevsky V.N., Livshits L.D. and Sizov I.A. (1978), “The mechanical properties of rocks. Deformation and fracture”, *Results of science VINITI technology. Ser. "Fracture Mechanics"*, vol.11, pp. 123-250.

3. ChengiTsi [and an.] (2006), “The structural hierarchy and mechanical properties of rocks. Part II. The structural hierarchy, the size effect and the strength”, *Physical mezo mechanics*, vol.9, no. 6, pp. 41-52.

4. Savushkin A.N., Kaspanov O.S. and Golnets S.A. (2015), "Effect of the loading velocity on the mechanical properties of titanium alloys antipyretic", *Electronic scientific journal "Proceedings of the VIAM"*, no №3.
5. Kolsky, G. (1955), *Volny napryazheniy v tverdyh telah* [Stress Waves in Solids], Publishing House of Foreign. lit., M., USSR.
6. Stavrogin, A.N. and Tarasov, B.G. (2001), *Experimentalnaya phisika I mekhanika gornyh porod* [Experimental physics and rock mechanics], Nauka, M., RU.
7. Ivanov, A., Sdzvzhkova, E. and Shashenko, A. (2010), "Modeling influence the speed of mining operations on the strength and stability of the rock working", *Gornictvo i Geoinzynieria*, vol. 34, no 2, pp. 307-314.
8. Protosenya, A.G. and Sinyakin, K.G.(2011), "Modeling of stress-strain state of the ore massif in the zone of influence of clearing works", *Zap. Horn. Inst.*, no 189, pp. 240-243.
9. Zhurkov, S.N.(1968), "Kinetic concept of strength of solids", *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*, no 3, pp. 168-183.
10. Mokhnachev, M.P. (1973), "Effect of loading velocity on the strength and deformation characteristics of rocks", *Invest. strength and deformability of the rocks*, pp. 40-80.
11. Stepanov, G.V. [and an.](2010), "Effect of the loading velocity on the strength of ceramic materials based on silicon carbide self-combination", *Problems of strength*, no 3, pp. 79-88.
12. Bayuk, E.I. [and an.]. (1988), *Phisicheskiye svoystva mineralov i gornyh porod pri vysokih termodynamicheskikh parametroh: Spravochnik* [The physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters: Directory], Nedra, M., SU.
13. *Vacro Von M.*, Mikeska J. (1968), "Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit von Gesteinen", *Freiberger Forschungshefte*, no A448, ss. 45-63.
14. Mansurov, V.A. (1982), *Povedenie gornyh porod pri razlichnyh skorostyah nagruzhenia* [Behavior of rocks under different loading velocities], Ilim, Frunze, USSR.
15. Zyukov, Yu.E. (2007), "Influence of coal faces moving velocity on the main roof caving in lavas", *Ugol Ukrainy*, no 1, pp. 16-18.
16. Kulinich, V.S. (1992), "Evaluation of the stress state of rock massif by local fracturing", *State Management extremely intense breeds*, pp. 55-63.
17. Regel, V.R., Sloutsker, A.I. and Tomashevskaya, E.E. (1974), *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdyh tel* [Kinetic nature of the strength of solids], Nauka, M., USSR.
18. Kumar, A. (1968) "The effect of stress rate and temperature on strength of basalt and granite", *Geophysics*, vol. 33, no 3, pp. 501-510.
19. Lindholm, U.S. Yeakley, L.M. and Nagy A. (1974), "The dynamic strength and fracture properties of dresser basalt", *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. Abstr*, vol. 11, no 5, pp. 181-191.

Об авторах

Скипочка Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, зав. отделом механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, skipochka@ukr.net

Паламарчук Татьяна Андреевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, tp208_2008@ukr.net

Яланский Анатолий Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

Бобро Николай Трофимович, инженер в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

Прохорец Лилия Викторовна, младший научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук

України (ІГТМ НАН України), Днепропетровск, Україна, liliya_prohorec@mai.ru

About the authors

Skipochka Sergei Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, skipochka@ukr.net

Palamarchuk Tatyana Andreevna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, tp208_2008@ukr.net

Yalansky Anatoly Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Bobro Nicolay Trophimovich, Master of Science, Engineer in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Prohorec Liliya Victorovna, Master of Science, Junior Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, liliya_prohorec@mai.ru

Анотація. Предмет досліджень - міцнісні властивості гірських порід. Мета - дослідження впливу швидкості навантаження на міцнісні властивості гірських порід. Методи дослідження - теоретичні та експериментальні дослідження, аналіз отриманих результатів. На підставі аналізу експериментальних і теоретичних досліджень встановлено, що в domeжевій області напруг зі зростанням швидкості навантаження зразків гірських порід їхня межа міцності на стиск збільшується за законом, близьким до логарифмічного, з асимптотичним наближенням до певного максимального значення, вище якого вплив збільшення швидкості перестає позначатися на величині зазначених параметрів. Показано, що істотний вплив на межу міцності гірських порід може чинити нерівнокомпонентний напружений стан, бічний або гідростатичний підпор, температура і позамежні швидкості деформування, що викликаються динамічними напруженнями від обвалень порід або гірських ударів і викидів порід, вугілля та газу.

Ключові слова: швидкість навантаження, швидкість деформування, міцність гірських порід, вуглепородний масив.

Abstract. Subject of the research is the rock strength properties. Objective of the research is to study how loading rates influence on the rock strength properties. Methods of the research is theoretical and experimental investigations and analysis of results. Basing on the analysis of experimental and theoretical studies, it is stated that in the pre-limit stress domain, with increased rate of the rock loading, the rock compressive strength also increases by a law close to the logarithmic law with an asymptotic approximation to a certain maximum value, above which further increment of the rate stops impacting on these parameters. It is further stated that a significant impact on the rock ultimate strength may cause different stress states for different components, side or hydrostatic backwater, exorbitant temperature and rates of deformation resulted from dynamic stresses due to the rocks caving or rock bumps and rock, coal and gas outbursts.

Keywords: loading rate, deformation rate, rock strength, coal and rock massif

Статья поступила в редакцию 25.01.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.А. Курносковым