

## ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УПРОЧНЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

**Ревва В.Н.** (ИФГП НАН Украины)

*Експериментально досліджені міцнісні та деформаційні властивості гірничих порід, які зміцнені магnezійним і карбамідним сполученнями, з урахуванням ширини розкриття тріщин і вологості породи та температури оточуючого середовища.*

### STRENGTH AND DEFORMATION BEHAVIOR OF BONDED ROCKS

**V.N. Revva**

*Strength and deformation characteristics of argillaceous rocks bonded with magnesia or carbamide compounds are studied experimentally subject to a crack opening displacement (COD), rock moisture, and ambient temperature.*

Одним из эффективных способов предварительного (упреждающего) упрочнения массива трещиноватых горных пород является физико-химический [1-4], основанный на принудительном нагнетании в нарушенный трещинами массив полимерных смол холодного отверждения, заполняющих трещины и скрепляющих отдельные блоки пород в монолит. Связанный таким образом массив становится устойчивым, что обеспечивает надежную работу шахтной крепи и повышает устойчивость горных выработок.

Эффективность применения скрепляющих составов для упрочнения горных пород зависит от горно-геологических и физико-химических факторов [5]. Одними из важнейших факторов, влияющих на процесс упрочнения кровли горных выработок, являются раскрытие трещин и влажность горных пород, а также температура окружающей среды.

В данной работе экспериментально исследованы прочностные и деформационные свойства горных пород, скрепленных магnezиальным и карбамидным составами, с учетом ширины раскрытия трещин и влажности породы и температуры окружающей среды.

Поскольку химико-минералогический состав пород, который вступает во взаимодействие с кислотным отвердителем упрочняющего состава, оказывает большое влияние на эффективность упрочнения, а также учитывая результаты предыдущих исследований [6,7], эксперименты проводились только на аргиллитах в пределах одной литологической разности. Из скрепляющих составов были выбраны наиболее эффективные магnezиальный с латексом и КФЖ с шавелевой кислотой.

Для экспериментальных исследований из кусков аргиллита на камнерезном станке выпиливались призматические образцы с ребром не менее 55 мм. Затем образец разрезался на две половины, наносился клеевой слой

толщиной 1, 2, 3, 4, 5 мм. После склейки он помещался в эксикатор. С использованием метода ЯМР [8] определялись времена  $t$  отверждения и сохранения оптимальных прочностных и деформационных свойств составов. Для исследуемых составов необходимые времена выдержки оптимальных свойств составили: для образцов, скрепленных магниальным составом – 10-13 суток; для образцов, скрепленных карбамидным составом – 3-7 суток.

Для экспериментов по оценке влияния влажности пород образцы аргиллита, естественная влажность у которых составляла  $W_n = 0,6\%$ , искусственно увлажнялись, а количество влаги определялось методом ЯМР. Удалось получить образцы, влажность у которых изменялась от 0,6 до 2%. После этого производилась склейка образцов и они на время отверждения помещались в эксикатор. Каждые сутки по спектрам ЯМР определялись фазовое состояние и вес контрольных образцов.

Экспериментальные образцы для исследования влияния температуры окружающей среды с определенной влажностью породы помещались в эксикаторы, а затем необходимое время выдерживались в холодильных камерах с температурами  $T = -10; 0; 5; 10^\circ\text{C}$ , а также при комнатной ( $24^\circ\text{C}$ ) температуре. Температура контролировалась с помощью термопары и потенциометра.

Подготовленные образцы скрепленных пород деформировались до разрушения на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) по методике ИФГП НАН Украины [9]. При этом были реализованы две схемы нагружения ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ), обеспечивающие минимальные уровни энергии деформирования:

$$1) \sigma_3 = 5 \text{ МПа}, \mu_\sigma = -0,8;$$

$$2) \sigma_3 = 5 \text{ МПа}, \mu_\sigma = 0,8;$$

где  $\sigma_3$  – минимальное сжимающее напряжение,

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \text{ - параметр вида напряженного состояния Лодена}$$

Надаи.

В процессе испытания образцов на УНТС фиксировались главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  и деформации  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ . Исследовались также два случая ориентации (параллельно и перпендикулярно) плоскости склейки образцов относительно направления действия преобладающего сжимающего напряжения. На основании экспериментальных результатов рассчитывались наиболее показательные механические константы, характеризующие прочностные и деформационные свойства скрепленных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия: объемная прочность образца  $\sigma_1^*$ , модуль объемного сжатия

$$K = \frac{\sigma_{cp}}{\varepsilon_{cp}}$$

где  $\sigma_{cp} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  – среднее напряжение,

$\varepsilon_{cp} = 1/3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$  средняя деформация,

и объемная деформация  $\frac{\Delta V}{V} = 3\varepsilon_{cp}$ .

Оценка влияния ориентации плоскости склейки упрочненных образцов показала, что при ориентации плоскости склейки перпендикулярно направлению действия преобладающего сжимающего напряжения  $\sigma_1$  разрушение происходит в основном по породе, а при ориентации параллельно  $\sigma_1$  разрушение образца осуществляется как по породе, так и по контакту порода - скрепляющий состав. В случае же, когда  $\mu_0 = -0,8$  образцы разрушаются в основном по склейке. Поэтому в дальнейших исследованиях упрочненных образцов рассматривалась только одна ориентация плоскости склейки относительно направления действия  $\sigma_1$  – параллельно (направление действия  $\sigma_3$  перпендикулярно плоскости склейки), а схема нагружения реализовывалась только одна:  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_0 = -0,8$ .

На рис. 1 представлены зависимости объемной прочности образцов, скрепленных магниезальным (кривая 1) и карбамидным составами (кривая 2), от толщины склейки, изменяющейся от 1 до 5 мм. Здесь и на других рисунках каждая точка на графиках соответствует 4-5 экспериментам.

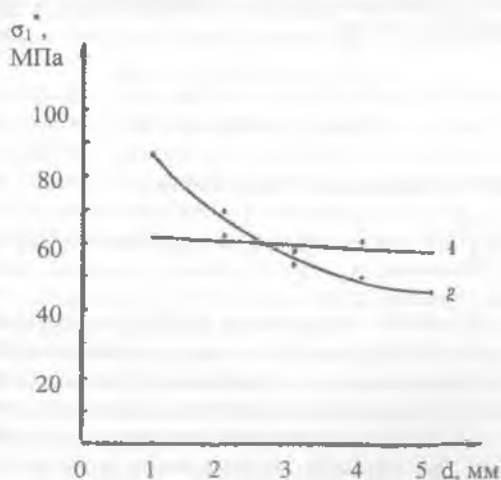


Рис.1. Зависимость объемной прочности  $\sigma_1^*$  упрочненных образцов аргиллита от толщины наносимого слоя d: 1 – для магниезального состава (t=10 суток); 2 – для карбамидного состава (t=3 суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_0 = -0,8$ ,  $Wn = 0,6\%$ ,  $T = 24^\circ\text{C}$ .

Для магнизального состава прочность упрочненных образцов почти не изменяется, хотя и наблюдается тенденция к уменьшению прочности с увеличением толщины склейки. С увеличением толщины склейки прочность образцов, скрепленных карбамидным составом, существенно уменьшается с 86 МПа до 45 МПа, т.е. на 48%. Деформационные свойства образцов, упрочненных магнизальным или карбамидным составами, существенно не зависят от толщины склеиваемого слоя.

Таким образом, можно предположить, что для пород кровли с сильной трещиноватостью наиболее эффективным будет упрочнение магнизальным составом.

Учитывая то, что наиболее высокие прочностные свойства скрепленные образцы имеют при толщине склейки 1 мм, в дальнейших экспериментах испытывались образцы только с этой толщиной склейки.

С увеличением влажности аргиллита от 0,6% до 1,8% прочность образцов, скрепленных магнизальным составом (рис. 2, кривая 1), уменьшается от 65 МПа до 39 МПа, т.е. на 40%.

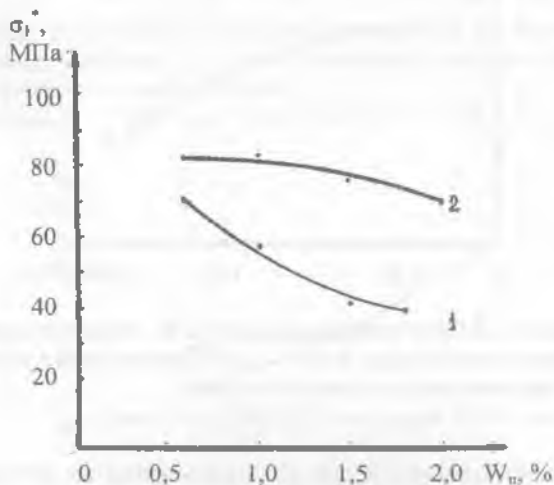


Рис.2. Зависимость объемной прочности  $\sigma_1$  упрочненных образцов аргиллита от влажности скрепляемой породы  $W_n$ : 1 – для магнизального состава ( $t=13$  суток); 2 – для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_c = -0,8$ ,  $T=24^\circ\text{C}$ ,  $d = 1$  мм.

Влияние влажности породы, упрочненной карбамидным составом, не столь существенно и при изменении ее от 0,6 % до 2% объемная прочность образцов уменьшается с 82 МПа до 69 МПа, т.е. только на 16%. Модуль объемного сжатия  $K$  образцов, скрепленных магнизальным составом, с увеличением влажности пород от 0,6% до 1,8% уменьшается от  $4,3 \cdot 10^3$

МПа до  $3,75 \cdot 10^3$  МПа (рис.3, кривая 1), т.е. на 13%, а объемная деформация  $\frac{\Delta V}{V}$  (рис. 4, кривая 1) увеличивается с  $36 \cdot 10^{-3}$  до  $45 \cdot 10^{-3}$ , т.е. на 25 %. Более существенно зависят от влажности деформационные свойства образцов, скрепленных карбамидным составом. Так с увеличением влажности пород от 0,6% до 2,0% модуль объемного сжатия скрепленных образцов (рис.3, кривая 2) уменьшается от  $3 \cdot 10^3$  МПа до  $1,4 \cdot 10^3$  МПа, т.е. почти в два раза, а объемная деформация (рис.4, кривая 2) при этом увеличивается с  $24 \cdot 10^{-3}$  до  $65 \cdot 10^{-3}$ , т.е. в 2,7 раза.

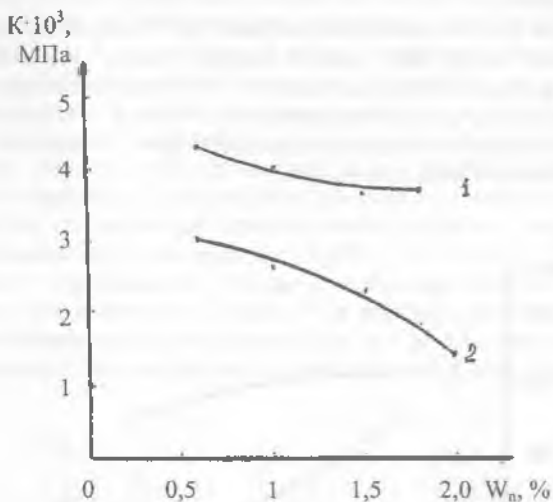


Рис.3. Зависимость модуля объемного сжатия  $K$  образцов аргиллита от влажности скрепляемой породы  $W_n$ : 1 – для магнезиального состава ( $t=13$  суток); 2 – для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_\sigma = -0,8$ ,  $T=24^\circ\text{C}$ ,  $d = 1$  мм.

На основании экспериментальных исследований следует вывод, что влажность скрепляемых пород более существенно влияет на прочностные свойства образцов, скрепленных магнезиальным составом, и на деформационные свойства образцов, упрочненных карбамидным составом.

Таким образом, можно предположить, что для условий повышенной влажности упрочняемых пород более эффективным будет упрочнение карбамидным составом.

С понижением температуры окружающей среды от  $24^\circ\text{C}$  до  $-10^\circ\text{C}$  объемная прочность образцов, скрепленных магнезиальным составом, почти не изменяется (рис. 5, кривая 1), а для случая упрочнения карбамидным составом объемная прочность образцов уменьшается с 82 МПа до 50 МПа (рис. 5, кривая 2), т.е. на 39 %.

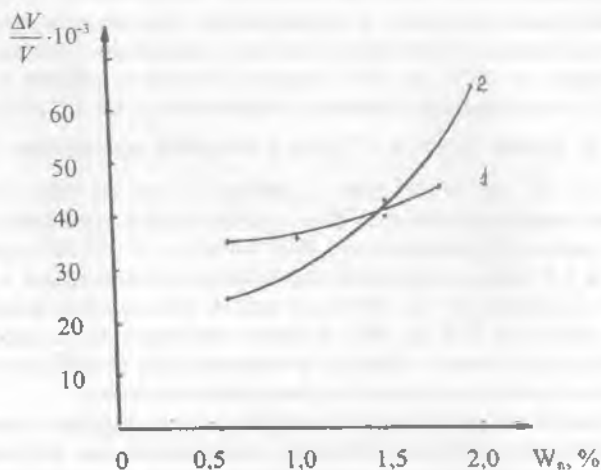


Рис.4. Зависимость объемной деформации образцов аргиллита от влажности скрепляемой породы: 1 – для магниального состава ( $t=13$  суток); 2 – для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_c = -0,8$ ,  $T=24^\circ\text{C}$ ,  $d = 1$  мм.

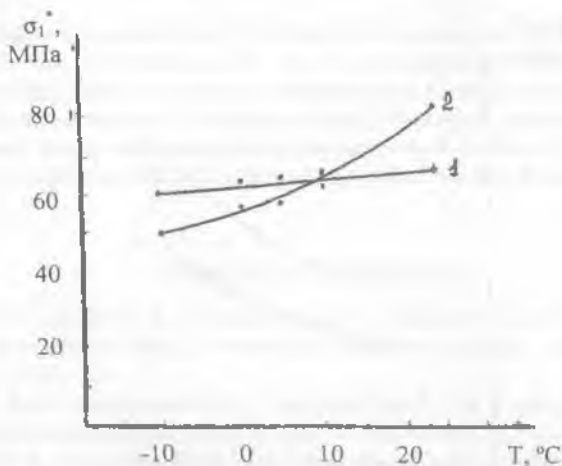


Рис.5. Зависимость объемной прочности  $\sigma_1^*$  упрочненных образцов аргиллита от температуры окружающей среды: 1 – для магниального состава ( $t=13$  суток); 2 – для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_c = -0,8$ ,  $T=24^\circ\text{C}$ ,  $d = 1$  мм.

Деформационные свойства образцов, скрепленных магниальным или карбамидным составами, с понижением температуры изменяются в сторону увеличения пластичности. Так при изменении температуры окружающей среды от  $24^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  модуль объемного сжатия  $K$  образцов, склеенных магниальным составом, уменьшается с  $4,4 \cdot 10^3$  МПа до  $2,6 \cdot 10^3$  МПа (рис. 6, кривая 1), т.е. в 1,7 раза, а объемная деформация  $\frac{\Delta V}{V}$  увеличивается с  $31 \cdot 10^{-3}$  до  $46 \cdot 10^{-3}$  (рис. 7, кривая 1), т.е. на 48%. У образцов, скрепленных карбамидным составом, с понижением температуры модуль объемного сжатия  $K$  уменьшается с  $3 \cdot 10^3$  МПа до  $1,6 \cdot 10^3$  МПа (рис. 6, кривая 2), т.е. в 1,87 раза, а объемная деформация увеличивается с  $21 \cdot 10^{-3}$  до  $45 \cdot 10^{-3}$  (рис. 7, кривая 2), т.е. почти в 2 раза. С повышением влажности окружающей среды от 72% до 98% влияние температуры на деформационные свойства скрепленных образцов становится еще более существенным, особенно, для случая упрочнения карбамидным составом.

Следовательно, понижение температуры окружающей среды увеличивает пластические свойства образцов, скрепленных как магниальным, так и карбидными составами, и существенно влияет на прочностные свойства образцов, упрочненных карбамидным составом. Поэтому для условий с пониженной температурой окружающей среды (например, условий вечной мерзлоты) наиболее эффективным будет упрочнение пород магниальным составом.

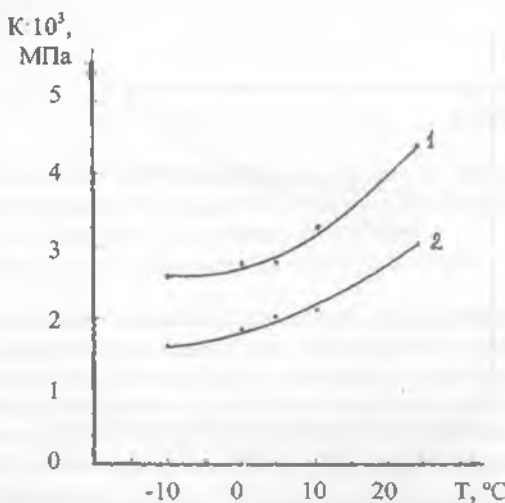
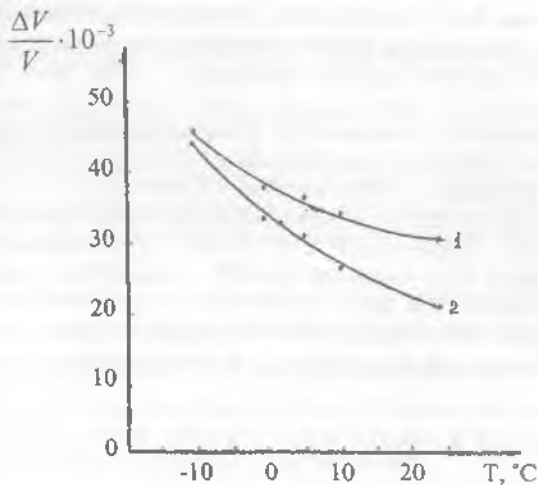


Рис.6. Зависимость модуля объемного сжатия упрочненных образцов аргиллита от температуры окружающей среды: 1 - для магниального состава ( $t=13$  суток); 2 - для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_0 = -0,8$ ,  $W_n = 0,6\%$ ,  $d = 1$  мм,



**Рис.7.** Зависимость объемной деформации упрочненных образцов аргиллита от температуры окружающей среды: 1 — для магнезиального состава ( $t=13$  суток); 2 — для карбамидного состава ( $t=5$  суток).

При этом  $\sigma_3 = 5$  МПа,  $\mu_\sigma = -0,8$ ,  $W_n = 0,6\%$ ,  $d = 1$  мм

На основании проведенных исследований можно сделать следующие рекомендации. Как магнезиальный, так и карбамидный составы могут быть использованы для упрочнения горных пород в условиях пониженной температуры и повышенной влажности пород. Наиболее эффективным будет упрочнение пород магнезиальным составом для условий пониженной температуры, а карбамидным составом для пород с повышенным содержанием влаги.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко И.Т., Кара В.В., Сальников В.К., Пихович И.Я. Химический способ упрочнения пород в очистных забоях угольных шахт. — Киев: Техника, 1978. — 67с.
2. Васильев В.В., Белоусов Ю.И., Срибный М.А. Об укреплении пород физико-химическим способом // Уголь. — 1982. - №2. — С.16-18.
3. Давыдов В.В., Белоусов Ю.И. Химический способ укрепления пород. — М.: Недра, 1977. — 228с.
4. Докукин А.В., Васильев В.В. Физико-химическое воздействие на массивы горных пород и угля. — М.: ЦНИЭИ уголь, 1982. — 49с.
5. Васильев В.В. Полимерные композиции в горном деле. — М.: Наука, 1986. — 296с.



6. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Ульянова Е.В., Левченко В.И. Оценка фазового состояния и прочностных свойств скрепляющих составов горных пород. //Физика и техника высоких давлений. – 1989.- Вып. 32. – С.55-57.
7. Ревва В.Н., Ульянова Е.В., Алексеев А.Д. Влияние влажности пород на эффективность их упрочнения скрепляющими составами. //Физика и техника высоких давлений. – 1990. – Вып. 34. – С.65-67.
8. Способ определения степени упрочнения малоустойчивой кровли горной выработки: А.С. 1724881 СССР Е21Д 11/00. / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Е.В. Ульянова, Н.А. Рязанцев (СССР). - №4692258. Заявлено 16.05.89; опубл. 07.04.92. Бюл. №13. – 3с.
9. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. – К.: Наукова думка, 1989. – 168с.