

УДК. 622.25.(06)

К вопросу об исследовании напряженно-деформированного состояния твердеющей монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола

Борщевский С. В.^{1,*}, Формос В. Ф.¹, Конько С. В.¹, Плешко М. С.²

¹ ДонНТУ, Донецк, Украина

² ШИ ЮРГТУ

Поступила в редакцию 21.12.08, принята к печати 02.11.09.

Аннотация

Рассмотрено влияние технологической схемы проходки на взаимодействие крепи с массивом пород. Отмечены особенности совмещенной технологической схемы. Получены значения относительной прочности бетона в различные сроки твердения. Исследовано напряженно-деформированное состояние призабойного участка крепи ствола.

Ключевые слова: крепь, бетон, ствол.

В настоящее время в нашей стране и странах СНГ проходка стволов осуществляется по совмещенной технологической схеме. В качестве крепи, как правило, применяется монолитный бетон классов В15 - В25, толщина крепи колеблется в пределах от 300 до 500 мм.

Технологическая схема строительства вертикального ствола оказывает значительное влияние на эффективность взаимодействия крепи вертикального ствола с породным массивом, так как определяет в частности величину отставания постоянной крепи от забоя выработки. Различными исследованиями было установлено, что взаимодействие системы «бетонная крепь – порода» во времени подразделяются на два периода. Первый характеризуется интенсивным ростом смещений пород, второй их медленным увеличением. При этом после обнажения пород в процессе проведения выработки происходит смещение обнаженной поверхности еще до возведения крепи. Смещения пород, продолжающиеся после возведения крепи, встречают ее сопротивление, вызывают взаимодействие крепи с массивом и обуславливают величину установившихся нагрузок на крепь [1].

Чем больше период времени Δt между обнажением пород и возведением постоянной крепи и произошедшие смещения, тем меньше будет величина нагрузки на возведенную крепь, передаваемую массивом пород.

В этой связи проходка стволов по совмещенной схеме является наиболее неэффективной, так как предусматривает возведение крепи вслед за подвиганием забоя. Это обстоятельство учитывается в различных нормативных документах и методиках расчета крепи.

В СНиП [2] влияние технологической схемы проходки учитывается с помощью коэффициента Δ , входящего в формулы по определению нормативного давления на крепь. При совмещенной схеме проходки значения нормативных нагрузок увеличиваются на 20 - 30 кПа по сравнению с параллельной или последовательной схемой.

В методике расчета крепи стволов [1], основанной на схеме контактного взаимодействия крепи и окружающего массива, влияние технологической схемы проходки учитывается путем введения в формулы по определению расчетных напряжений вокруг выработки корректирующего множителя α^* . Его физический смысл можно представить в виде выражения

* E-mail: ggf@mine.dgtu.donetsk.ua

$$\alpha^* = \frac{u_0}{u_\infty},$$

где u_0 – начальные смещения выработки до установки крепи;
 u_∞ – полные смещения выработки, в случае ее оставления без крепи.

Определение коэффициента α^* возможно в результате аналитического анализа механических моделей массива, обработки результатов натуральных измерений, численного моделирования и др. Как правило, он представляются в виде функциональной зависимости от параметра L/R , где L – это отставание постоянной крепи от забоя, R – радиус ствола.

Однако в целом приведенные методики используются для определения нагрузок на крепь из бетона, набравшего свою проектную прочность.

Рассмотрим особенности крепления стволов при совмещенной схеме проходке.

После укладки бетонной смеси за опалубку, она постепенно набирает прочность и обжимается смещающимся внутрь ствола массивом. В этот момент времени опалубку и твердеющий бетон можно рассматривать как двухслойную крепь с жестким внутренним слоем и внешним податливым слоем, обладающим ярко выраженными свойствами пластичности и ползучести.

Загружение бетонной крепи происходит после отрыва опалубки от возведенной заходки. Рассмотрим ближайшие к забою 7 заходок крепи в момент времени отрыва и установки опалубки от последнего возведенного кольца бетона (рис. 1).

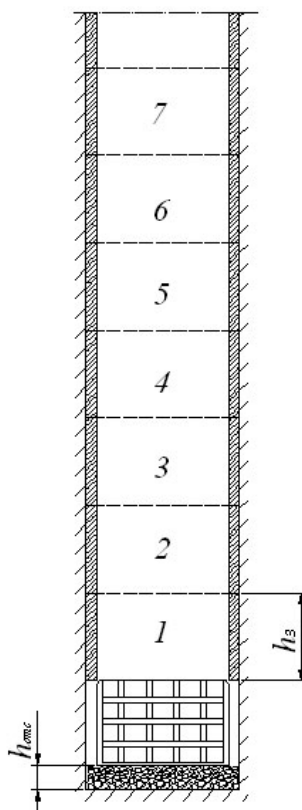


Рис. 1. Совмещенная технологичная схема крепления ствола

Отставание последнего возведенного кольца крепи от забоя составит $h_3 + h_{omc}$ (рис. 1).

Срок твердения бетона исследуемых заходок будет определяться продолжительностью проходческого цикла. При четком соблюдении циклического графика ведения работ, возраст бетона ближайших к забою заходок в любой момент времени можно определить из выражения

$$T_n = t_1 + (n - 1) \cdot t_y, \quad (1)$$

где n – номер заходки, считая от забоя ствола;

t_1 – срок твердения бетона последней возведенной заходки;

t_u – продолжительность проходческого цикла.

Несущая способность монолитной бетонной крепи определяется прочностью бетона на сжатие, которая растет с увеличением возраста бетона.

Для определения прочности бетона в ранние сроки твердения в технологии бетона [3] используют различные эмпирические зависимости, связывающие прочность бетона в проектном возрасте с прочностью в требуемом возрасте. Так широкое распространение получила зависимость

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28},$$

где R_n, R_{28} – прочность бетона на сжатие в возрасте n и 28 сут;

$\lg n, \lg 28$ – десятичный логарифм возраста бетона.

Если известна прочность бетона при сроке твердения k и 28 сут то прочность бетона в исследуемом возрасте можно найти из выражения:

$$R_n = R_k + (R_{28} - R_k) \frac{\lg n - \lg k}{\lg 28 - \lg k}.$$

Рассмотренные зависимости дают удовлетворительные результаты при возрасте бетона более трех суток.

При сроке твердения бетона 1...3 сут на скорость набора прочности бетона большое влияние оказывает водоцементное соотношение, поэтому более точно прочность определяется из выражения:

$$R_{1-3} = A \cdot R_u \left(\frac{C}{B} - k \right),$$

где A – коэффициент, учитывающий влияние на прочность бетона заполнителей и других факторов, изменяющийся в пределах $A=0,37 \div 0,65$;

R_u – активность цемента в возрасте 1...3 сут;

C/B – цементно-водное отношение;

k – поправочный коэффициент, принимаемый равным 1, при сроке твердения $t=1$ сут, $k=1,3$; при $t=2$ сут, $k=1,1$; при $t=3$ сут, $k=1,3$

Рассмотренные выше формулы позволяют приближенно оценить интенсивность набора прочности бетона по мере его твердения, однако не учитывают все факторы, влияющие на этот процесс.

В целом прочность бетона при любом сроке твердения зависит от многих переменных:

$$R_b = F(f_u; f_{c.б}; f_{cp}; f_{б.р}),$$

где f_u – функция, характеризующая свойства цемента: – активность, минералогический состав, структуру зерен, зерновой состав, удельную поверхность реагирующих частиц исходного цемента;

$f_{c.б}$ – функция, описывающая состав и структуру бетона: количество воды, вступившей в химическую связь с цементом, количество несвязанной воды в бетоне, вид и количество добавок, введенных в бетонную смесь; прочность, зерновой и минералогический состав заполнителей, объем вовлеченного воздуха, размеры и распределение пор и капилляров в теле бетона;

f_{cp} – функция, характеризующая свойства окружающей среды: температуру, относительную влажность, давление;

$f_{б.р}$ – функция, учитывающая технологию бетонных работ: способ приготовления, транспортировки, укладки и уплотнения бетонной смеси.

Влияние ряда рассмотренных выше факторов можно оценить путем определения прочности по температурно-временному фактору:

$$R_b = \bar{R} \cdot \left[1 - \left(1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tau_i}{1000 \cdot e^{-0,176 \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_h \cdot t_{cp}}}} \right)^3 \right],$$

где R – средняя прочность бетона, МПа;

$\Delta \tau_i$ – продолжительность i -того временного интервала, сут;

t_{cp} – средняя температура рассматриваемого временного интервала, °С;

k_c – коэффициент влияния марки цемента ($k_c=0,937 \dots 1,181$);

k_d – коэффициент влияния химической добавки; ($k_d=0,488 \dots 1,122$);

k_h – коэффициент влияния водоцементного отношения ($k_h=0,442 \dots 1,448$);

Наиболее точные данные о прочности бетона можно получить в результате лабораторных исследований образцов бетона.

В результате статистической обработки результатов испытаний бетонов, различного состава, используемых в шахтном строительстве, авторами была получена полоса значений относительной прочности бетона (в долях от 28 сут. прочности) в возрасте 1...7 суток (рис. 2).

Кривые максимальной и минимальной интенсивности набора прочности бетона аппроксимируются следующими логарифмическими зависимостями:

$$R_{\max}(T) = 0,3342 \ln(T) + 0,2709;$$

$$R_{\min}(T) = 0,2555 \ln(T) + 0,0707.$$

Рост прочности бетона по кривой $R_{\max}(T)$ характерен для бетонов с низким водоцементным отношением при добавлении в состав бетонной смеси комплексных добавок на основе сульфопластификаторов: С-3+СН, 10-03+СН, С-3+ННХК и др.

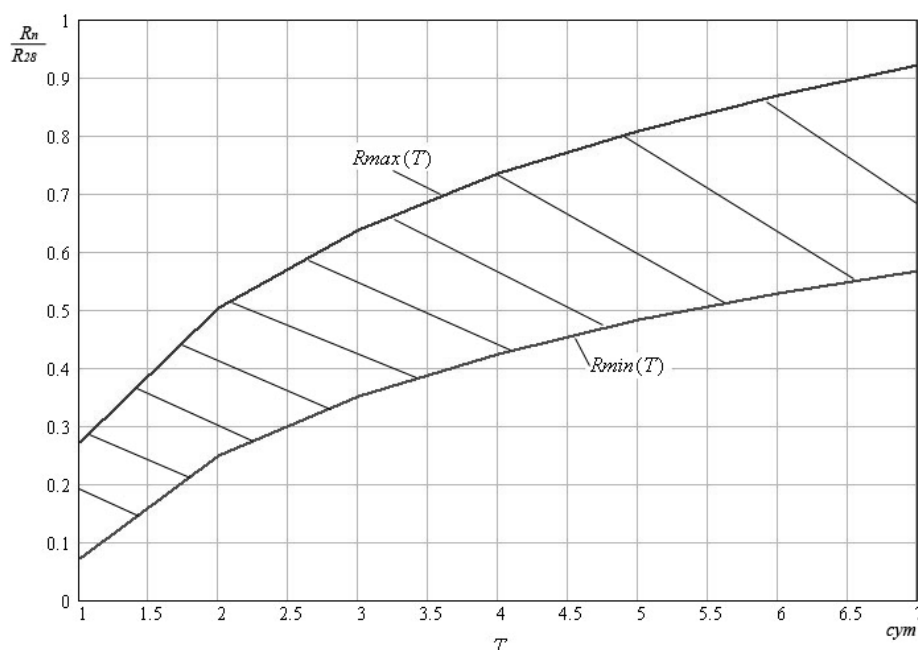


Рис. 2. Набор прочности бетона различного состава

Замедленный набор прочности, соответствующий кривой $R_{\min}(T)$ показывают бетоны с водоцементным отношением 0,7, приготовленные на шлакопортландцементе, рядовых заполнителях без использования добавок.

При проведении исследований не учитывалось возможное замедление набора прочности бетона при зимнем бетонировании, которое можно исключить проведением специальных мероприятий, а также не рассматривался ряд быстротвердеющих цементов и многокомпонентных добавок, позволяющих резко увеличить набор прочности бетона, так как эти материалы только начинают применяться в шахтном строительстве.

В соответствии с определенными параметрами возведения и твердения монолитной бетонной крепи при совмещенной схеме проходки, было выполнено численное моделирование призабойного участка ствола в различных породах методом конечных элементов.

В результате расчета объемных конечно-элементных моделей получены значения максимальных сжимающих напряжений в крепи при различных нагрузках. Для каждой заходки крепи был определен коэффициент напряженности бетона заходки:

$$K_n = \frac{N}{R_{сж}}$$

где N – максимальные сжимающие напряжения в крепи, мПа;

$R_{сж}$ – прочность бетона рассматриваемой заходки на сжатие.

В качестве примера рассмотрим изменение коэффициента K_n для крепи толщиной 300 мм, марки бетона М200, при расстоянии забоя от поверхности 500 м. Продолжительность проходческого цикла примем равным 24 ч, высоту заходки – 4 м. Возраст бетона первых семи заходов определим по формуле (1), прочность бетона будет изменяться в пределах $R_{min}(T)$ - $R_{max}(T)$, согласно графику (рис. 1).

В табл. 1 приведены средние значения коэффициента K_n первых семи заходов крепи, а также для крепи вне зоны влияния забоя ствола, набравшей проектную прочность.

Табл. 1. Средние значения коэффициента напряженности бетона

№ заходки, считая от забоя ствола	Возраст бетона Т, сут	Средние значения коэффициента K_n при величине модуля упругости пород массива, мПа·10 ⁻³					
		5	10	15	20	24	45
1	1.0	1.303	0.700	0.482	0.370	0.312	0.154
2	2.0	1.117	0.630	0.439	0.337	0.285	0.141
3	3.0	1.075	0.617	0.432	0.333	0.281	0.140
4	4.0	1.053	0.611	0.430	0.332	0.281	0.140
5	5.0	1.033	0.604	0.427	0.331	0.280	0.140
6	6.0	1.005	0.593	0.420	0.326	0.276	0.138
7	7.0	0.970	0.575	0.409	0.317	0.269	0.135
-	28.0	0.896	0.548	0.395	0.309	0.263	0.138

Изменение коэффициента напряженности крепи различного возраста в зависимости от модуля упругости вмещающих пород приведена на рис. 3.

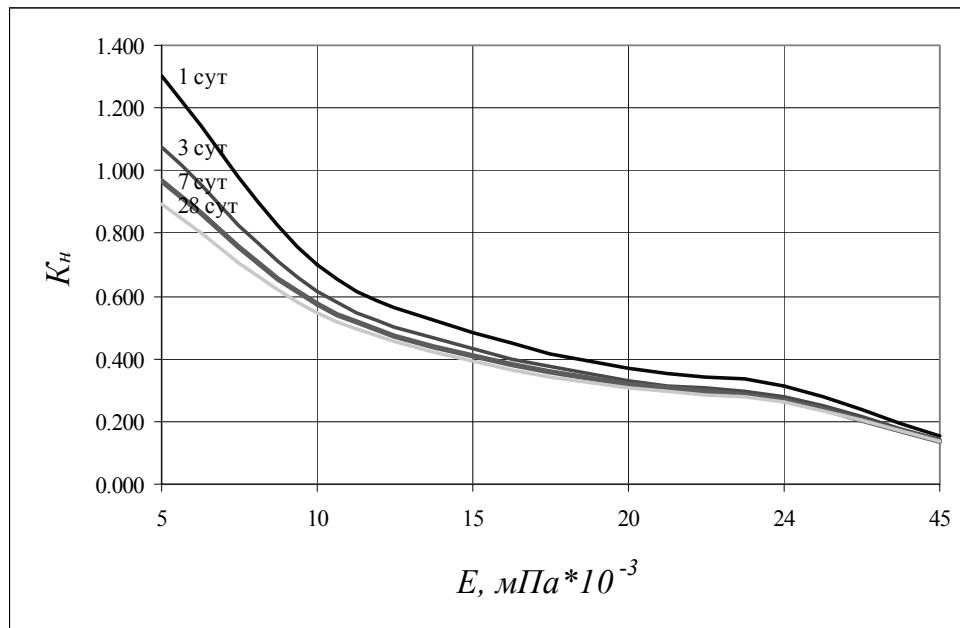


Рис. 3 Изменение коэффициента напряженности крeпи различного возраста в зависимости от модуля упругости вмещающих пород

Аналогичные исследования были проведены для монолитной бетонной крeпи толщиной до 500 мм, марок бетона М200 - М300, при глубине забоя ствола до 1000 м.

Обработка результатов исследований показала, что монолитный бетон первых трех заходок крeпи испытывает значительно более интенсивные воздействия со стороны породного массива, чем затвердевший бетон крeпи вне зоны влияния забоя ствола, что особенно проявляется в слабых породах. Это нарушает процесс естественного набора прочности бетона и может привести к развитию различных нарушений в крeпи.

Особенности эксплуатации монолитной бетонной крeпи на ранних стадиях ее возведения целесообразно учитывать при разработке проекта крепления вертикальных стволов, что позволит повысить качество крепления. Улучшить условия эксплуатации крeпи можно путем перехода на параллельные схемы проходки, с возведением постоянной крeпи с отставанием от забоя ствола до 20 - 25 м.

Библиографический список

1. Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
2. СНИП II-94-80 «Подземные горные выработки» / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 31 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. Учебник – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.

© Борщевский С. В., Формос В. Ф., Конько С. В., Плешко М. С., 2010

Анотація

Розглянутий вплив технологічної схеми проходки на взаємодію крeпи з масивом порід. Відмічені особливості поєднаної технологічної схеми. Набуті значень відносної міцності бетону в різні терміни твердіння. Досліджений напружений-деформований стан призабойного ділянки крeплення ствола.

Ключові слова: крeплення, бетон, ствол.

Abstract

The article deals with the influence of the shaft sinking technique on the interaction between the lining and the rock mass. The author describes the peculiarities of the combined technique, determines the relative stress value of concrete in different periods of hardening and studies the stress – strain state of the face area of the shaft lining.

Keywords: lining, concrete, shaft.