

УДК 622.25(06)

Д.И. Шинкарь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОЙ КРЕПИ

Рассмотрены закономерности формирования свойств материалов крепи под воздействием технологических факторов. Приведены полученные зависимости для определения модуля деформации и меры ползучести бетонной составляющей крепи. Ключевые слова: комбинированная крепь, вертикальный ствол, горное давление, гидростатическое давление.

Особенностью комбинированных крепей является соединение в одной конструкции материалов с резко отличными свойствами, например, монолитный бетон и железобетон, чугун, сталь, анкеры, бетонные и железобетонные блоки, которые по-разному воспринимают растягивающие и сжимающие напряжения, по-разному деформируются под внешними нагрузками и при температурных колебаниях, имеют отличающиеся в десятки раз пределы прочности. Учет всех особенностей входящих в крепь материалов в математической модели невозможен, так как нахождение общих закономерностей в математической форме всегда подразумевает определенную идеализацию объекта исследования. Важнейшими во всех методиках расчета признаются геометрические и деформационные характеристики слоев комбинированной крепи. Если характеристики чугунных тубингов, стали, железобетонных блоков известны достаточно точно, ввиду их изготовления в заводских условиях, то правильность определения свойств бетона, укладываемого на месте, является вопросом более сложным. Так модуль деформации бетона зависит от моду-

ля деформации крупного заполнителя и цементного камня; состава бетона (содержание отдельных компонентов); степени твердения/возраста бетона; плотности/пористости (в т. ч. применения уплотнения); условий твердения; влияния влажности и температуры на этапе эксплуатации; введения добавок (ускорителей схватывания, пластификаторов бетонной смеси); величины, характера, порядка нагружения (проявление свойств ползучести при нагружении бетона на ранних стадиях твердения) и т.д. Также очевидна зависимость модуля деформации от технологии изготовления и характера эксплуатации, это обусловлено изготовлением бетона «на месте» и вводом его в работу до окончания процесса набора прочности.

Используемые при проектировании строительных конструкций данные, приводимые в СНиП 2.03.01-8, жёстко привязывают значение начального модуля упругости к прочности бетона на одноосное сжатие, сходный подход применен и в зарубежных нормативах, например DIN 1045-1. Для условий, в которых деформационные характеристики бетона имеют большое значение, выведены зависимости позволяющие учесть,

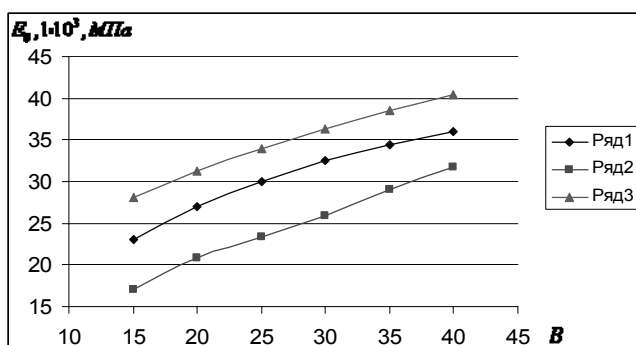


Рис. 1. Расчётные значения $E_b(T)$ определённые по различным методикам:

Ряд 1 – по данным табл. 18 СНиП 2.03.01-84; Ряд 2 – рассчитанные данные для бетонов с подвижностью свыше 8 см и максимальным размером крупного заполнителя до 40 мм. Ряд 3 – рассчитанные данные для бетонов с подвижностью до 8 см и максимальным размером крупного заполнителя до 80 мм

помимо прочности, максимальный размер крупного заполнителя и подвижность смеси СНиП 2.06.08-87.

На рис. 1 представлены рассчитанные по СНиП 2.06.08-87 и взятые из СНиП 2.03.01-84 данные о модуле деформации бетона в 28 суточном возрасте.

Как видим, совпадение наблюдается только при размере крупного заполнителя 40 мм, подвижности смеси св. 8 см. и возрасте бетона 180 сут. Игнорирование только одного фактора - размера крупного заполнителя и подвижности смеси, может привести к вариативности определения начального модуля упругости до 50 %.

Строгое выдерживание норм на компоненты, близкая к эталонной консистенция смеси и благоприятные условия набора бетоном прочности, дают значения близкие к рекомендуемым в (СНиП 2.03.01-84). Так, например, опыты [1] выполненные с подбором компонентов по соответствующим нормативам, на трёх различных видах щебня, дали результаты отличающихся от рекомендуемых DIN

1045-1 (аналог СНиП 2.03.01-84) не более чем на 10 %.

Исходя из сказанного выше, можно заключить, что значения, рекомендуемые в СНиП 2.03.01-8 являются надежными и имеют достаточную точность только в очень узком диапазоне условий, которые при строительстве вертикальных стволов, с креплением по существующим технологиям обеспечены быть не могут [2].

Анализ приведенных данных показывает, что для получения надежных результатов при проектировании комбинированной крепи необходимо провести дополнительные исследования, которые позволят учесть влияние основных факторов и специфики изготовления, транспортировки, твердения и нагружения бетонного компонента.

Анализ научной и научно-технической литературы позволил выделить основные технологические факторы, влияющие на деформационные характеристики (модуль упругости, модуль деформации, мера ползучести, относительные предельные деформации) бетона и диапазоны их варьирования (табл. 1).

Для проведения экспериментальных исследований был выбран состав соответствующий применяемым в шахтном строительстве при креплении вертикальных стволов комбинированными чугунно-бетонными и сталебетонными крепями:

цемент – 320 кг, марки М400;
щебень – 1250 кг, максимальный размер зерен 20 мм, согласно данным по проходке стволов с комбинированной крепью и в соответствии с

Таблица 1

Изучаемые факторы и уровни их варьирования

№	Наименование фактора	Минимальное значение	Максимальное значение
1	Время приложения нагрузки, t_1 , сут.	0,5	1,5
2	Подвижность смеси, ОК, см.	16	26
3	Время действия нагрузки, T_1 , сут.	3	181

Таблица 2

Коэффициенты регрессии, детерминации и уровни значимости уравнения регрессии и его отдельных членов

Рассматриваемая переменная	E_{b28}			
	0,92892			
Коэффициент детерминации, R^2				
	Регрес. коэффициент	Уровень значимости, p	Стандартная ошибка	$t(14)$ - критерий
a	40819,07	0,000000	4505,491	9,05985
a_1	2021,28	0,436643	2524,165	0,80077
a_2	-2372,15	0,044064	1072,214	-2,21239
a_3	-2165,78	0,000280	450,787	-4,80444
a_4	41,04	0,001730	10,628	3,86099
a_5	1,55	0,880941	10,158	0,15254
a_6	-0,05	0,144723	0,034	-1,54468
a_7	115,91	0,076676	60,651	1,91117
a_8	5,27	0,144292	3,411	1,54647
a_9	0,12	0,731625	0,341	0,34989

требованиями ГОСТ 10180 - 78, при размере образцов $10 \times 10 \times 40$ см.;

песок – 670 кг;

вода – количество воды подбиралось опытным путем до достижения необходимой подвижности смеси.

Для проведения эксперимента был использован стандартный центральный композиционный план для 3-х факторов с 16 опытами.

Опыты проводились на образцах призмах, размером $10 \times 10 \times 40$ см, и кубах, размером $10 \times 10 \times 10$ см. Исследования выполнялись по методике изложенной в ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 24544-81.

Модули упругости бетона в возрасте t сут. находились по формуле:

$$E_b(t) = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_{1y(i+1)}}, \text{ МПа}$$

где $\Delta\sigma_1 = \sigma_{t_{i+1}} - \sigma_{t_i}$ - приращение напряжений в момент времени t_{i+1} ;

$\sigma_{t_i} = 0,3 \times R_b(t_i)$ - напряжения в образце в момент времени t_i ;

$\sigma_{t_{i+1}} = 0,3 \times R_b(t_{i+1})$ - напряжения в образце в момент времени t_{i+1} ;

$R_b(t_i)$, $R_b(t_{i+1})$ - предел прочности образца соответственно в момент времени t_i и t_{i+1} ;

$\varepsilon_{1y(i+1)}$ - относительная деформация образца, возникшая после приложения нагрузки $\Delta\sigma_1$, в момент времени t_{i+1} .

Зависимость модуля упругости бетона, после отсеивания факторов имеющих не существенное значение (значение α менее 0,05) искалась в виде:

$$E_{b28} = a + a_1 \cdot t_1^2 + a_2 \text{OK} + a_3 \text{OK}^2 + a_4 \text{OK}_1 \cdot t_1, \text{ МПа.}$$

Найденные регрессионные коэффициенты приведены в табл. 2.

Как показало сравнение эффектов, наибольшее влияние на величину

Таблица 3

Коэффициенты регрессии, детерминации и уровни значимости уравнения регрессии и его отдельных членов

Рассматриваемая переменная	$C(t_1, T_1)$			
Коэффициент детерминации, R^2	0,91678			
	Регрес. коэффициент	Уровень значимости, p	Стандартная ошибка	$t(14)$ – критерий
a	4,546543	0,799006	17,51861	0,25953
a_1	4,811905	0,631532	9,81466	0,49028
a_2	-0,718570	0,865623	4,16907	-0,17236
a_3	-0,592461	0,740370	1,75279	-0,33801
a_4	0,024371	0,564779	0,04133	0,58971
a_5	0,158969	0,001253	0,03950	4,02495
a_6	-0,000678	0,000147	0,00013	-5,15275
a_7	-0,255585	0,296774	0,23583	-1,08378
a_8	0,000031	0,998141	0,01326	0,00237
a_9	0,001318	0,336713	0,00132	0,99481

модуля упругости бетона оказывает подвижность смеси и в меньшей мере время нагружения образцов и продолжительность действия нагрузки.

Меру ползучести бетона находили по формуле:

$$C(t_1, T_1) = \frac{\bar{\varepsilon}(t_1, T_1)}{\sigma_b(t_1)}, \text{ МПа}^{-1}$$

где $\bar{\varepsilon}(t_1, T_1)$ - пластическая деформация от нагрузки, приложенной в момент t_1 и действующей на протяжении периода T_1 ; $\sigma_b(t_1)$ - нагрузка, приложенная в момент времени t_1 .

Учитывая специфику проведения эксперимента в данной формуле необходимо учесть ступенчатое приложение нагрузки в момент времени t . Считая характер зависимости ползучести от нагрузки на допредельном уровне ($0,3R_b$) близким к линейному приведенную выше формулу для определения меры ползучести представили в виде:

$$C(t_1, T_1) = \sum_{i=0,5}^n \frac{\bar{\varepsilon}(t_i, T_j)}{\sigma_b(t_i)}, \text{ МПа}^{-1}$$

где $\bar{\varepsilon}(t_i, T_j)$ - пластическая деформация образца от приложенной в мо-

мент t_i нагрузки величиной $\sigma_b(t_i)$; $i=0,5; 0,8; 1; 1,3; 1,5; 3; 5; 7; 10; 14; 28$ сут.

После отсеивания факторов со статистической значимостью менее $\alpha=0,05$, было получено уравнение регрессии для меры ползучести в виде:

$$C(t_1, T_1) = a + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot OK + a_3 \cdot T_1 + a_4 \cdot T_1^2, \text{ МПа}$$

Найденные регрессионные коэффициенты приведены в табл. 3.

Полученные зависимости учитывают специфические условия возведения крепи в вертикальных стволах и позволяют определить деформационные характеристики бетонной составляющей комбинированной крепи значительно ближе к реальным значениям.

К настоящему моменту накоплено много данных о несоответствии характера работы комбинированной крепи при критических нагрузках расчетным прогнозам. Так неоднократно отмечалось явление разрушения внутреннего слоя комбинированных крепей (чугунные тубинги) при сохранении внешнего слоя - бетона

[3, 4], также известны случаи, когда монолитная бетонная крепь успешно эксплуатировалась в условиях, при которых по расчетным данным должно было произойти разрушение [5]. Анализируя опыт проектирования, авторы пришли к выводу, что такие случаи могут быть объяснены допущенными ошибками в определении деформационных характеристик материалов крепи.

В крепи однородной конструкции неверное определение деформационных характеристик материала, особенно в сторону их завышения, не влечет серьезных последствий. В этом случае крепь под нагрузкой реализует большие деформации, соответственно напряжения в материале будут меньше расчетных [6]. В многослойных же конструкциях деформационные характеристики материала ниже проектных значений приведут к перераспределению напряжений. В результате внешние слои будут пассивно передавать нагрузку, их несущая способность будет использоваться не в полной мере, в то время как внутренние слои будут воспринимать долю нагрузки больше проектной, это может привести к их разрушению, что и наблюдалось на практике.

Рассмотрим более подробно один из наиболее характерных случаев, разрушение чугуно-бетонной крепи вертикального ствола рудника «Пийло». Исходные данные возьмем из [3]. Расчет произведем по методике, рекомендованной приложением к СНиП [7], основанной на точном аналитическом решении Н.И. Мухелишвили первой основной задачи теории упругости для кольца при произвольных нагрузках. Данная методика получила наиболее глубокую разработку в трудах Н.С. Булычёва [4].

Как показал расчет, при достижении чугуном тубингов предельного состояния значения напряжений в бетоне в 2,3 раза превышают предел прочности на одноосное сжатие и в 1,17 раза предел прочности в условиях объемного напряженного состояния. Автором работы [3] выполнен расчет в предположении превышения напряжениями предела прочности чугуна на изгиб (450 МПа) и далее, исходя из условия непрерывности деформаций на границе слоев, величина напряжений в бетоне определена как $\sigma_{\text{in}(4)}=90$ МПа. Это в 4 раза выше предела прочности бетона на одноосное сжатие и почти в два раза выше предела прочности в условиях объемного напряженного состояния.

Автором выполнен расчет значения модуля упругости бетона с учетом найденных зависимостей. При этом напряжения в бетоне оказываются существенно меньше не только предела прочности на объемное сжатие, но и на одноосное. В то время как напряжения в чугуне тубингах на 3% больше предельно допустимых. Что полностью соответствует результатам фактических наблюдений.

Применение результатов проведенных экспериментальных исследований позволяет проектировать комбинированные крепи с обеспечением большей надежности работы конструкции. Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием наблюдаемым фактам и возможностью математически описать явление, до настоящего времени, не имевшее объяснения. В качестве дальнейшего направления исследований определено изучение нескольких составов бетона, выделение и учет в разрабатываемых зависимостях наиболее значимых свойств компонентов смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weber R., Riechers H.-J. Kies und Sand für Beton. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2003. – 140 S.
2. Масленников С.А. Особенности работы бетона в комбинированной чугуно-бетонной крепи/ Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: сб. научн. трудов. Вып. 15. – Донецк: «Норд-Пресс», 2009. – С. 16-18.
3. Сергеев С.С. Разработка методов диагностики и прогноза напряжённого состояния крепи вертикальных шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях. Дисс. На соискание учёной степени д. т. н. Тула. – 1997 г. – 321 с.
4. Булычёв Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1989. – 270 с.
5. Влох Н.П., Зубков А.В., Боликов В.Е. Формирование напряжений в крепи вертикальных стволов / Шахтное и подземное строительство. – 1986. – №1, с. 21-22.
6. Плешко М.С., Крошнев Д.В. Особенности совместной работы системы «армировка - крепь - породный массив» в глубоких вертикальных стволах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. С. 168-171.
7. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчёту крепи/ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР.-М.: Стройиздат. – 1983. – 272 с.

ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шинкарь Денис Игоревич – аспирант, Шахтинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» (Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ(НПИ)), телефон: (8636)222036.



ГОРНАЯ КНИГА



**Горный информационно-аналитический бюллетень.
Отдельный выпуск № 6.
Институт угля Сибирского отделения РАН
2013
532 с
ISSN 0236-1493 (в пер.)
УДК 622**

В сборник вошли статьи по проблемам создания эффективных технологий разработки угольных месторождений, обеспечения безопасности ведения горных работ, угольного машиностроения, мониторингу экологической и сейсмической обстановки в угледобывающих регионах на основе современных информационных технологий.
Для специалистов горнодобывающих отраслей.