Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVIII, вып. 1, 1969 г.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ В ИСКУССТВЕННЫХ ЦЕЛИКАХ

Т. Н. Смирнова

В последние годы на рудниках применяется система разработки с твердеющей закладкой, позволяющая свести до минимума потери руды в недрах. На Гайском руднике, где производится одновременная разработка месторождения подземным и открытым способами, эффективное, экономически выгодное применение данной системы и безопасность работ в карьере определяются правильно выбранными физико-механическими свойствами твердеющей закладки. Отсутствие в горно-технической литературе данных по прочностным и упругим свойствам закладки не позволяет достаточно обоснованно подойти к выбору параметров системы разработки и вызывает необходимость проведения широких исследований по изучению этих свойств, а именно: предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, изгиб $\sigma_{изг}$, растяжение $\sigma_р$, модуля пропорциональности E, угла внутреннего трения ρ, сцепления c и влажности w.

Для создания искусственных целиков на рассматриваемом руднике применяется закладка на основе доменных шлаков. В 1 $м^3$ закладки содержится 360 *кг* гранулированного шлака с тонкостью помола 0,075 *мм* (65%), 1250 *кг* песка с 5-й залежи, 40 *кг* портланд-цемента марки 400, 350 *л* воды. Объемный вес свежеуложенной смеси составляет 2 $т/м^3$.

Исследование инертных заполнителей производилось лабораторией крепления горных выработок Унипромеди по

ГОСТ 8735—65. Испытанием получены следующие характеристики песка: средний диаметр зерен 0,44 *мм*; объемный вес в насыпном состоянии 1,28 *г/см*^{3}, удельный вес 2,50 *г/см*^{3}; содержание пылевидных и глинистых частей 10,7%; суммарная поверхность зерен 4,67 *м*^{2}*/кг*; модуль поверхности — 25.

Твердеющая закладка такого состава оказалась в 5 раз дешевле бетонной. Кроме того, практика работы рудника показала, что искусственные целики, выполненные из твердеющей закладки, в силу своей вязкости и пластичности значительно лучше противостоят действию динамических нагрузок по сравнению с целиками, выполненными из бетона.

Отбор проб отвердевшей закладки из целиков производился кернами при бурении скважин и непосредственно со стенок экспериментальной выработки в целике. Для сохранения естественной влажности пробы после отбора парафинировались.

Образцы изготавливались вручную с помощью ножовочных полотен и ножей. Готовые образцы представляли собой кубы или цилиндры высотой, равной их диаметру. Опорные поверхности образцов шлифовались до параллельности граней с точностью 0,05—0,1 *мм*. Контроль параллельности проводился с помощью специальной индикаторной стойки с прямоугольным столиком конструкции ИГД им. А. А. Скочинского.

Методика испытаний образцов не отличалась от применяемой для бетона или горных пород, широко освещенной в литературе [Протодьяконов и др., 1964; Ягодкин, Мохначев, 1962; Ломтадзе, 1952; Фисенко, 1956; Механические свойства ..., 1948]. При выборе размера образца для испытаний руководствовались необходимостью исключения влияния объемного и поверхностного эффектов, которые, согласно исследованиям проф. М. И. Койфмана [Исследование ..., 1962], существенно влияют на результаты испытаний.

Для образцов твердеющей закладки характерны две особенности: 1) высыхание поверхностного слоя образцов на глубину 2—3 *мм* в процессе их обработки и испытания; 2) выкрашивание включений из обрабатываемых плоскостей, вследствие чего опорные поверхности образцов становятся неровными и влияют на результаты испытаний, причем степень их влияния определяется размерами образцов. Для исключения такого влияния (так же как и объемного, где существенную роль играют размеры включений) были проведены специальные исследования по определению физико-механических свойств твердеющей закладки на образцах в форме кубиков с размерами от 1,5 до 14 *см*. Результаты исследований представлены

на рис. 1, из которого видно характерное повышение $\sigma_{сж}$, E и времени деформирования образцов до разрушения с увеличением их размеров до 7—9 *см*. При дальнейшем увеличении размеров указанные характеристики почти не изменялись. В связи с этим для исключения влияния поверхностного и объемного эффектов и получения более стабильных значений физико-механических свойств твердеющей закладки к испытанию принимались образцы со стороной основания или диаметром, равными 7—9 *см*.

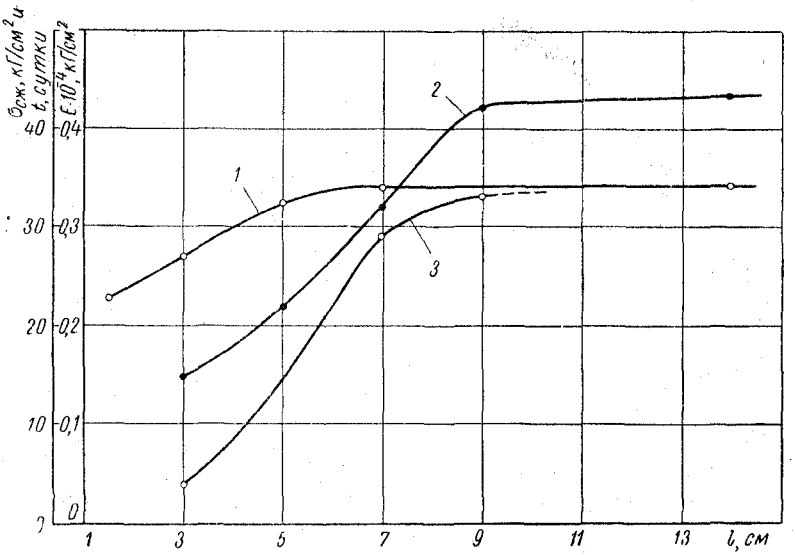


Рис. 1. Изменение физико-механических свойств твердеющей закладки от размеров образцов:

1 — предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$; *2* — модуль пропорциональности; *E*; *3* — время деформирования образцов до разрушения при $\sigma = 0{,}7\sigma_{сж}$

Испытания на сжатие 50—300 образцов по каждому целику, изготовленных из кернов скважин, которые бурились под определенным углом к наслоению на всю высоту целика, показали, что прочность закладки изменяется в широких пределах, например, для целика 11-го восточного — от 25 до 100 *кГ/см*². На основе экспериментальных исследований и теоретического расчета построены графики для определения расчетного значения $\sigma_{сж}$ (рис. 2). Из рис. 2 видно, что экспери-

ментальная кривая (*а*) подчиняется закону нормального распределения (*б*). Наиболее вероятные значения прочности закладки по данным кривых распределения представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, наиболее вероятное значение предела прочности закладки на сжатие по различным целикам изменяется от 24 до 55 *кГ/см*^{2}. Одной из основных причин такого колебания прочности является возраст закладки.

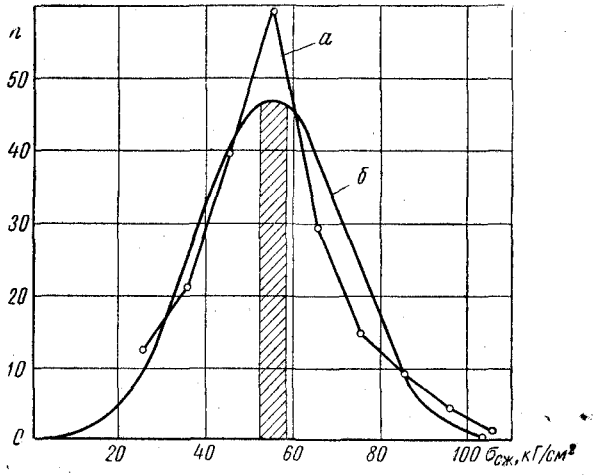


Рис. 2. Графики распределения прочности закладки по целику 11-му восточному

На основании данных табл. 1 установлена корреляционная связь между пределом прочности закладки в массиве $\sigma_{сж}$ и ее возрастом t, которая выражается эмпирической формулой

$$\sigma_{сж} = 14t^{0,423} \qquad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0{,}62$. Для удобства пользования уравнение (1) представлено в виде

$$\sigma_{сж} = 12\sqrt{t}. \qquad (2)$$

Разница в вычисленных значениях прочности по уравнениям (1) и (2) при возрасте закладки от 5 до 25 мес. не превышает 3—5%.

Таблица 1

Результаты определения прочности твердеющей закладки по различным искусственным целикам *

Целик	t, месяц	n**	$\sigma_{сж}$ кГ/см²	
			средний $\sigma_{сж}$	доверительные границы среднего значения
Восточный				
4	14	54	38	28—48
5	—	—	33	30—36
6	12	188	40	37—43
Западный				
11	12	83	39	35—43
Центральный				
12	12	164	31	28—34
11	18	190	55	52—58
6	9	50	40	—
6	3	21	24	—
6	22	17	55	—

* Испытание образцов и обработка результатов проведены совместно с К. Ю. Репп и Е. М. Городцовым.

** n — число испытанных образцов.

Отношение прочности закладки $\sigma_{сж}$ в массиве целика по истечении времени t к прочности ее в 28-дневном возрасте σ_{28} составляет

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{28}} = \sqrt{\frac{t}{28}}. \qquad (3)$$

Для бетонов существует связь

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{28}} = \frac{\lg t}{\lg 28}. \qquad (4)$$

Сравнивая выражения (3) и (4), приходим к выводу, что твердеющая закладка в массиве искусственных целиков быстрее набирает прочность, нежели бетонные образцы, твердеющие в условиях лаборатории. Причиной, по всей вероятности, является высокая температура, развивающаяся при затвердевании закладки в шахтных условиях. Проведенные исследования деформирования образцов закладки с различным пределом прочности на сжатие позволили сделать следующие выводы.

1. Закладка с пределом прочности на сжатие, равным 7—60 *кГ/см*², проявляет свойства хрупко-пластичных горных пород (по классификации Л. И. Барона).

2. Пропорциональность между напряжениями и деформациями сохраняется до напряжений, составляющих 66—80% от разрушающего.

3. Между модулем пропорциональности закладки и пределом прочности на сжатие при изменении $\sigma_{сж}$ от 0 до 100 *кГ/см*² существует корреляционная связь вида

$$E = 60\sigma_{сж}^{1,13}. \qquad (5)$$

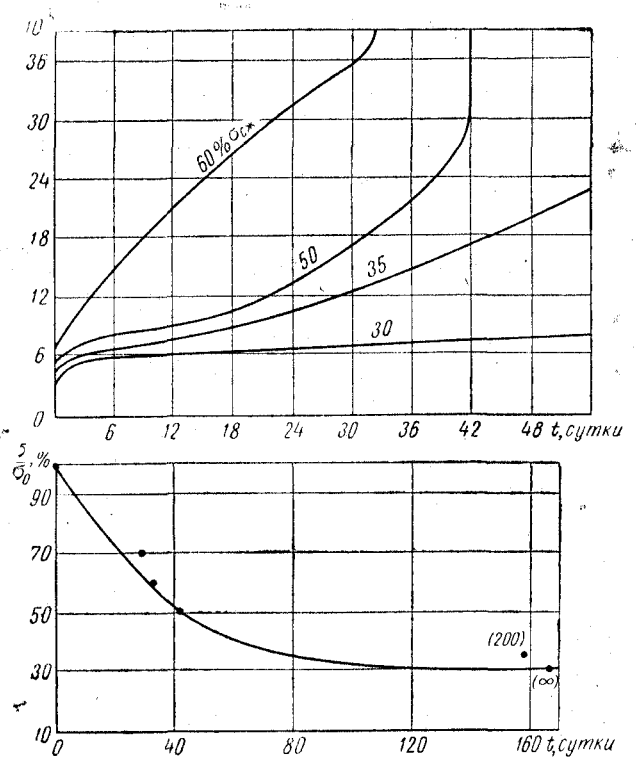


Рис. 3. Графики ползучести (*а*) и длительной прочности (*б*) для твердеющей закладки с $\sigma_{сж} = 30$ *кГ/см*²

4. Величина деформации образцов, соответствующая концу участка пропорциональности, увеличивается с уменьшением прочности закладки по гиперболическому закону.

При нагружении и разгрузке образцов закладки и руды остаточные деформации составляют соответственно 80 и 16% от общей.

Для определения изменения предела прочности на сжатие и характера деформирования твердеющей закладки под действием длительной нагрузки были проведены исследования по следующей методике. Образец, предел прочности материала которого заранее определен по обычной методике, выдерживали под постоянной нагрузкой или до разрушения, или до полного прекращения деформаций, которые замеряли индикаторами часового типа с точностью 0,002—0,001 *мм*. Испытания проведены при напряжениях, составляющих 60, 50, 35 и 30% от предела прочности на сжатие. Кривые деформации по времени представлены на рис. 3, *а*, из которого видно, что при напряжении, составляющем 60% от $\sigma_{сж}$, образец разрушился через 33, а при 50% — через 42 дня. При напряжении 30% от $\sigma_{сж}$ деформации по времени развиваются весьма медленно и постепенно затухают; появляется участок ползучести (текучести).

Таблица 2

Физико-механические характеристики твердеющей закладки по центральному целику 6 в возрасте 9 месяцев

Характеристика	Количество испытанных образцов	Коэффициент вариации, %	Тройная ошибка коэффициента вариации, %
$\sigma_р = 4{,}9 \div 7{,}1$ *кГ/см²* (6,1)*	30	24	9,6
$\sigma_{изг} = 9{,}1 — 16{,}0$ *кГ/см²* (11,9)	6	6,5	5,1
$E = 0{,}1 \div 0{,}97 \cdot 10^4$ *кГ/см²*	10	E зависит от $\sigma_{сж}$	
$C = 10$ *кГ/см²*	29	—	—
$\rho = 20$ *град*	29	—	—
$\gamma = 1{,}55 \div 1{,}87$ *г/см³* (1,68)	33	22	12
$w = 38{,}3 \div 35{,}5$ % (47,5)	15	9,4	5,0
$\sigma_{длит} = 12$ *кГ/см²*	5	—	—

* *В скобках указаны их средние значения.*

На основании кривых текучести построен график длительной прочности твердеющей закладки в зависимости от продолжительности приложения нагрузки (рис. 3, *б*). Из графика по величине и характеру приложения нагрузки можно определить ту прочность, при которой закладка не разрушится независимо от продолжительности приложения нагрузки. Из рис. 3, *б* видно, что величина длительной прочности закладки составляет 30—35% $\sigma_{сж}$. Значения физико-механических характеристик закладки в возрасте 9 мес. по целику 6-му центральному приведены в табл. 2.

Выводы

1. Для исключения влияния объемного и поверхностного эффектов и получения более стабильных значений физико-механических свойств закладки к испытанию следует принимать образцы со стороной основания или диаметром, равным 7—9 *см*.

2. Между пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и возрастом t закладки существует связь $\sigma_{сж} = \frac{5}{6}12\sqrt{t}$.

3. Пропорциональность между напряжениями и деформациями при испытаниях закладки на сжатие сохраняется до напряжений, составляющих 66—80% от разрушающего. Величина деформации образцов, соответствующая концу участка пропорциональности, увеличивается с уменьшением прочности закладки по гиперболическому закону.

4. Между модулем пропорциональности закладки E и пределом прочности на сжатие существует корреляционная связь вида

$$E = 60\,\sigma_{сж}^{1,13}.$$

5. При нагружении и разгрузке образцов закладки остаточные деформации составляют 80% от общей. В связи с этим замер напряженного состояния искусственных целиков не может производиться распространенными в настоящее время методами разгрузки, основанными на упругом восстановлении элемента при отделении его от основного массива. Напряжения в целиках могут быть определены путем замера деформаций целиков с последующим переходом к напряжениям по кривым деформация—напряжение.

6. Предел длительной прочности закладки составляет 30—35% $\sigma_{сж}$.

ЛИТЕРАТУРА

Барон Л. И., Логунцев Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород (справочное пособие). Госгортехиздат, 1962.

Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. Изд-во АН СССР, 1962.

Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. Госгеолиздат, 1952.

Механические свойства горных пород Донбасса. Углетехиздат, 1948.

Протодьяконов М. М. и др. Паспорта прочности горных пород и методы их определения. Наука, 1964.

Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов угольных карьеров. Углетехиздат, 1956.