УДК 622.273.218

В.П.ПИРОЖЕНКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

РАЗРАБОТКА СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по выбору объемных содержаний компонентов закладочных смесей, приготавливаемых из хвостов обогащения медной руды Джезказганского ГМК (Корпорация «КазМыс»). Наряду с обеспечением. Полученные закладочные смеси характеризуются необходимой нормативной прочностью, стабильностью реологических свойств, однородностью структуры и относительно низкой стоимостью в связи с сокращением в 1,5-1,7 раза содержания цемента марки М400.

In paper the theoretical and experimental research results on selection of volume composition of backfilling mixture making from Dzhezkazgan copper ore tailings are presented. The obtained backfilling mixture not only provides the normative strength characteristics but also characterized by stability of rheological properties, good portability and moreover by uniformity of internal structure at relative low contents of cement M400.

Системы разработки подземных месторождений руд цветных металлов с закладкой выработанного пространства остаются наиболее дорогостоящим и энергоемким процессом. На ряде рудников и шахт рост подземных пустот значительно опережает объемы заложенных выработок, что приводит к обострению экологической ситуации добывающих территорий. С увеличением глубины разработки и усилением проявлений горного давления при применении систем с камерным способом отработки возрастают потери и разубоживание руды. Для предотвращения нарушений земной поверхности приходится оставлять значительные запасы в охранных целиках, что приводит к сокращению активных рудных площадей и замораживанию запасов руды. Интенсификация технологий подземной добычи, особенно руд цветных металлов, возможна лишь при совершенствовании технологических процессов ведения закладочных работ с разработкой новых композиционных составов из отходов обогащения минерального сырья, как инертного наполнителя. Такие технологии дают возможность снизить стоимость закладочной смеси и позволяют сформировать в отработанных пустотах подземные техногенные месторождения с заданными физико-химическими свойствами из однородных по минеральному составу материалов и вяжущих, что допускает в будущем их вторичную переработку.

Применение отходов обогащения минерального сырья (текущих хвостов) в качестве наполнителя закладочных смесей продолжает оставаться актуальной проблемой. Добыча руды с закладкой выработок в странах СНГ к настоящему времени составляет лишь 25-30 % от общего объема добычи подземным способом. Подготовка смеси из текущих хвостов переработки предусматривает сгущение хвостовой пульпы до высокой концентрации (50 % твердого по объему гидросмеси) и гидравлическое транспортирование сгущенного наполнителя в смеситель (как правило, барабанного типа), где производится смешивание наполнителя с вяжущим материалом (цементом) с получением собственно закладочного материала. Таким образом, технологический процесс ведения закладочных работ состоит из трех основных стадий:

- сгущение исходной хвостовой пульпы до требуемой концентрации твердой фазы в сгущенном продукте;

• подача сгущенного продукта в барабанный смеситель и смешивание с вяжущим материалом;

• самотечный гидротранспорт закладочной смеси в выработанное пространство и укладка в камеру.

Все три стадии процесса взаимосвязаны между собой. Пластичность закладочной смеси, ее транспортабельность, расслаиваемость, а также прочность искусственного массива зависят от степени сгущения исходной пульпы и доли вяжущего материала (цемента) на единицу объема закладочной смеси. Общим фактором является реологическая структура сгущенного продукта, значение и величина которой, определяемые динамическим коэффициентом вязкости, устанавливаются на стадии сгущения. В этих условиях важное значение получает стабильность характеристик приготовленной закладочной смеси, к которым относятся: расход вяжущего, концентрация инертного наполнителя (хвостов обогащения), плотность сгущенного продукта и его вязкость.

Прочность закладочного массива определяется соотношением компонентов, составляющих закладочную смесь. Доля вяжущего материала в объеме смеси при использовании мелкозернистых хвостов обогащения может быть значительно снижена. В практике ведения закладочных работ применяются смеси, прочность которых в искусственном массиве достигается большим расходом цемента. В табл.1 приведены составы закладочных смесей на основе хвостов обогащения некоторых горно-обогатительных комбинатов.

Приведенные в табл.1 составы закладочных смесей получены с использованием хвостов обогащения с фракциями твердых частиц, бо́льшими 0,074 мм, выделяемыми в пески при сгущении в гидроциклонах. Нормативная прочность порядка 2-2,5 МПа/см^2 (в зависимости от горно-геологических условий) обеспечивается повышенным расходом цемента, в среднем 180-300 кг/м^3. Экспериментальные данные показывают, что расход вяжущего можно сократить, если в

Таблица 1

Составы применяемых закладочных смесей

Предприятие	Расход на 1 м^3 смеси, кг			Параметры смеси				
				Содержание, мас. %			Плотность, кг/м^3	В:Ц
	Хв	Ц	В	Хв	Ц	В		
Иртышский ГМК	1425	280	400	67,7	13,3	19,0	2105	1,43
	1238	280	450	63,8	13,9	22,3	2018	1,61
	1148	280	500	59,5	14,5	26,0	1928	1,79
	1088	280	550	54,8	15,2	30,0	1538	1,96
	868	280	600	50,0	16,0	34,0	1748	2,14
Новоберезовский рудник	1430	210	410	20,0	10,0	20,0	2050	1,95
	1344	210	410	58,3	9,1	32,6	2304	3,57
	1204	210	500	63,0	11,0	26,0	1914	2,33
	1064	210	550	58,3	11,5	30,2	1624	2,62
	924	210	600	53,3	12,1	34,6	1734	2,86
Лениногорский полиметаллический комбинат	1482	180	390	72,2	8,8	18,0	2054	2,17
	1344	180	440	67,6	9,4	23,0	1913	2,44
	1054	180	480	61,5	10,5	28,0	1714	2,67
	875	180	520	55,6	11,4	33,0	1575	2,89
Джезказганский ГМК	1250	230	400	66,5	12,2	21,3	1860	1,73
	1200	300	450	61,6	15,4	23,1	1950	1,50
	1200	280	430	62,8	14,7	22,5	1910	1,53

Примечание: Хв – хвосты обогащения полиметаллических руд; Ц – цемент; В – вода; В:Ц – водоцементное соотношение.

состав закладочной смеси включить частицы хвостов крупностью от 0,044 до 0,074 мм, т.е. мелкие фракции, которые стабилизируют реологические параметры закладочных смесей.

Существующие эмпирические формулы для определения количества цемента, расходуемого на 1 м^3 закладочной смеси, не учитывают влияния мелких классов инертного наполнителя на конечную прочность искусственного массива. Анализ экспериментальных результатов показывает, что с увеличением содержания цемента при определенном содержании инертного наполнителя прочность массива монотонно возрастает, а с увеличением времени твердения прочность стабилизируется на некотором предельном для данного состава значении. Анализ различных составов закладочных смесей показывает, что существует некоторый интервал максимального и минимального содержания компонентов, при которых еще достигается нормативная прочность. Из данных табл.1 следует, что на 1 м^3 закладочной смеси наименьшее количество хвостов обогащения составляет 868 кг, а наибольшее 1482 кг; цемента – соответственно, 180 и 280 кг. Отсюда следует, что существует некоторая определенная функциональная зависимость прочности искусственного массива от соотношения компонентов, вид которой можно установить с использованием экспериментальных результатов.

Представим функцию прочности от переменных параметров в следующем виде

$$R = f\left(c, \mu, T, c_{\ddot{o}}\right), \qquad (1)$$

где R – прочность закладки, МПа; c – объемная концентрация твердых частиц хвостов обогащения в смеси; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; $\dot{O}$ – время твердения, сутки; $\tilde{n}_{\ddot{o}}$ – объемное содержание цемента в 1 м^3 закладочной смеси, относительные объемные проценты (об. %).

Для дальнейшего анализа функцию (1) запишем в виде степенного полинома

$$R = e^{\alpha 0} c_{\ddot{o}}^{\alpha 1} \mu^{\alpha 2} \dot{O}^{\alpha 3}, \qquad (2)$$

где $e^{\alpha 0}$ – постоянный коэффициент, α_0-α_3 – показатели степени при параметрах модели, определяемые на основе экспериментальных данных.

Для определения действительных значений прочности от содержания компонентов были приготовлены экспериментальные образцы закладочных смесей, причем содержание отдельных компонентов принималось с учетом данных табл.1. Для обработки экспериментальных результатов использовалось варьирование переменных на верхнем и нижнем значениях (уровнях варьирования). Принимались следующие значения параметров: количество цемента марки М400 – максимальное 280 кг (0,09 м^3), минимальное 150 кг (0,048 м^3); количество хвостов оценивали по наибольшему и наименьшему значению вязкости, зависящей от концентрации гидросмеси хвостов обогащения. Замеры вязкости гидросмеси на ротационном вискозиметре РВ-8 показали, что для максимального содержания хвостов обогащения с массовой концентрацией 0,78 вязкость составляла 0,2 Па·с, а для массовой концентрации сгущенных хвостов 0,418 вязкость была равна 0,185 Па·с, которые и примем за верхний и нижний уровней варьирования переменного фактора, k – число факторов. В итоге количество необходимых и достаточных опытов будет равно $N = 2^3 = 8$, а полный факторный эксперимент будет задан матрицей, уровни варьирования. За нижний уровень варьирования времени T принимаем 14 суток, а за верхний – 28 суток.

План эксперимента задается матрицей 2^k

№	x_1	x_2	x_3	x_0
1	–	–	–	+
2	+	–	–	+
3	–	+	–	+
4	+	+	–	+
5	–	–	+	+
6	+	–	+	+
7	–	+	+	+
8	+	+	+	+

где k – число факторов; x_0-x_3 – постоянный член и значения переменных факторов (цемента, вязкости, времени), соответственно; знак «+» – значение фактора на верхнем уровне; знак «–» – значение фактора на нижнем уровне.

Для реализации экспериментов были приготовлены четыре группы закладочных смесей (табл.2). Опытные данные прочности образцов закладки приведены в табл.3.

Таблица 2

Составы экспериментальных закладочных смесей

Номер эксперимента	Компоненты, кг/м^3			Параметры смеси		Уровни варьирования	
	Ц	Хв	В	$c_ц$, об. %	μ, Па·с	$c_ц$	μ
I	150	979	554	4,8	0,185	–	–
II	150	1080	453	4,8	0,200	–	+
III	280	979	530	9,0	0,185	+	–
IV	280	1080	467	9,0	0,200	+	+

Таблица 3

Значения параметров и прочность экспериментальных образцов

Опыт	Параметры смеси			Значение прочности, МПа				
	$c_ц$, об. %	μ, Па·с	T, сут	Эксперимент 1	2	3	4	Среднее
1	4,8	0,185	14	0,397	0,398	0,398	0,399	0,398
2	4,8	0,200	14	0,58	0,62	0,59	0,61	0,600
3	9,0	0,185	14	2,04	2,00	1,98	2,06	2,02
4	9,0	0,200	14	3,44	3,40	3,46	3,38	3,42
5	4,8	0,185	28	0,51	0,55	0,52	0,54	0,53
6	4,8	0,200	28	0,91	0,89	0,88	0,92	0,9
7	9,0	0,185	28	2,91	2,95	2,92	2,94	2,93
8	9,0	0,200	28	4,92	4,88	4,91	4,89	4,9

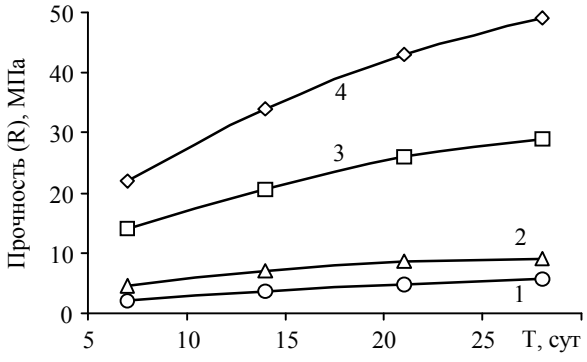

Рис.1. Зависимость прочности образцов закладки R от времени твердения T

1 – цемент – 150 кг/м^3; вязкость – 0,185 Па·с; 2 – 150 кг/м; 0,200 Па·с; 3 – 280 кг/м^3; 0,185 Па·с; 4 – 280 кг/м^3; 0,200 Па·с

Для получения достоверных результатов было приготовлено 32 экспериментальных образца закладочных смесей, которыми заполнялись кубические формы с гранями, равными 7 см (стандартные образцы). Часть образцов (16) выдерживалась при температуре 17 °С в термостате в течении 14 суток, другая часть в том же количестве выдерживалась в течение 28 суток, что соответствовало верхнему и нижнему уровням варьирования времени твердения T. После истечения контрольного времени образцы подвергались сжатию на гидравлическом прессе до полного разрушения. Кривые прочности образцов в зависимости от времени твердения по каждому из составов закладочной смеси приведены на рисунке.

При обработке результатов использовались методы регрессионного анализа и метода наименьших квадратов. Исходим из того, что функция (2) должна быть линейна по параметрам, поэтому после логарифмирования этой функции получаем линейную модель следующего вида

$$\ln R = \alpha_0 + \alpha_1 \ln c_ö + \alpha_2 \ln \mu + \alpha_3 \ln T, \quad (3)$$

где α_i – коэффициенты линейной модели.

Введем обозначения и запишем (3) в следующем виде

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3, \quad (4)$$

где $y = \ln R$ – функция отклика, x_i – переменные факторы линейной модели, логарифмы переменных.

Для оценки коэффициентов α_i при x_i вычислим логарифмы соответствующих значений по данным табл.3. Расчеты сведем в табл.4.

Матрица плана и полученные значения параметров по табл.4 дают следующие значения коэффициентов линейной модели α_i:

$$\alpha_0 = 14{,}5;\ \alpha_1 = 2{,}791;\ \alpha_2 = 4{,}984;\ \alpha_3 = 0{,}541.$$

Таким образом, справедлива модель

$$\breve{Y} = 14{,}5 + 2{,}791x_1 + 4{,}984x_2 + 0.541x_3.$$

Проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и проверка однородности дисперсий и адекватности линейной модели по критерию F показали, что

Таблица 4

Логарифмы значений параметров линейной модели

№ пп.	План эксперимента				Значения параметров линейной модели				Функция отклика
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_0	x_1	x_2	x_3	
1	+	–	–	–	1	–3,037	–1,687	2,639	–0,921
2	+	–	+	–	1	–3,037	–1,609	2,639	–0,511
3	+	+	–	–	1	–2,408	–1,687	2,639	0,788
4	+	+	+	–	1	–2,408	–1,609	2,639	1,229
5	+	–	–	+	1	–3,037	–1,687	3,332	–0,635
6	+	–	+	+	1	–3,037	–1,609	3,332	–0,105
7	+	+	–	+	1	–2,408	–1,687	3,332	1,075
8	+	+	+	+	1	–2,408	–1,609	3,332	1,589

коэффициенты значимы, дисперсии однородны, а линейная модель адекватна.

В итоге модель в действительных значениях переменных факторов получает следующий вид:

$$R = e^{14,5} c_{\text{ö}}^{2,791} \mu^{4,984} \grave{O}^{0,541},$$

где $\mathring{a}^{14,5}$ – постоянный коэффициент.

Полученная экспериментальная формула позволяет по известным соотношениям компонентов смеси прогнозировать прочность закладочного массива по истечении некоторого времени твердения или по заданной прочности закладочного массива определить необходимые соотношения компонентов приготавливаемой закладочной смеси.