

УДК 622.27

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ**

Л. А. Крупник¹, Ю. Н. Шапошник², С. Н. Шапошник³, Г. Т. Нуршайыкова³

¹Казахский национальный исследовательский технический университет,
ул. Сатпаева, 22, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: shaposhnikyury@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³Восточно-Казахстанский государственный технический университет,
ул. Серикбаева, 19, 070000, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Разработана технология закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего для условий Артемьевской шахты. Показано, что достижение нормативной прочности закладки с применением доменных гранулированных шлаков достигается при тонине помола до 80 % класса – 80 мкм. Проанализировано влияние тонины помола доменных гранулированных шлаков различных производителей на прочностные характеристики и реологические свойства закладки. Проведен экономический анализ затрат на вяжущее при формировании несущего слоя закладочного массива при использовании составов закладки с золой уноса и молотыми доменными гранулированными шлаками.

Закладочные смеси, цементно-зольное и цементно-шлаковое вяжущие, молотые доменные гранулированные шлаки, прочностные характеристики, реологические свойства закладки, закладочные работы

DOI: 10.15372/FTPRPI20190109

В настоящее время на горнодобывающих предприятиях, обрабатывающих рудные месторождения системами разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, с целью сокращения затрат на дорогостоящее вяжущее широко применяются доменные гранулированные шлаки (ДГШ), обладающие способностью к самостоятельному гидратационному твердению [1–3]. Благодаря использованию грубодисперсного доменного гранулированного шлака с оптимальной дисперсностью, можно снизить расход портландцемента до 40 % с одновременным повышением прочности закладочного массива на 8 %, а при использовании тонкомолотого шлака (удельная поверхность по Блейну 420–470 м²/кг) экономится до 60–70 % цемента с одновременным повышением прочности бетона до 50 % [4].

СОСТОЯНИЕ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ НА АРТЕМЬЕВСКОЙ ШАХТЕ

Закладочные смеси на основе цементно-шлакового вяжущего применяются на ряде рудников России, Казахстана и Украины. Так, на Тишинском руднике ДГШ с открытого склада доставляется автотранспортом на приемную площадку и далее в промежуточный бункер, откуда конвейером подается в шаровую мельницу МШР 3200 × 3100. В ней ДГШ измельчается до

крупности 50 % содержания класса – 80 мкм и по самотечному трубопроводу поступает в смеситель [5]. Использование на Малеевском руднике ДГШ позволило сократить расход цемента со 160 до 55 кг/м³ закладки. В настоящее время подача закладки с поверхностного бетонозакладочного комплекса (БЗК) в шахту в объеме 500 тыс. м³ в год осуществляется в самотечном режиме при основном составе закладочной смеси закладки, кг/м³: цемент М-400 — 60; ДГШ молотый, класс – 0.08 — 120; ДГШ молотый, класс + 0.08 — 120; пески отвалыные + 2.5 — 470; легкая фракция + 2.5 — 705; вода — 460 [6]. Следует отметить, что на Тишинском и Малеевском рудниках выемку запасов руд проводят поэтажно-камерной системой разработки с закладкой. В перспективе на строящихся подземных рудниках ТОО “Казцинк” Ново-Лениногорского рудника наиболее целесообразна технология производства закладочной смеси мельничным способом на основе цементно-шлакового вяжущего с использованием в качестве заполнителя смеси дробленой горной массы и отходов горно-металлургического производства с самотечной доставкой закладочной смеси в выработанное пространство трубопроводным транспортом. Перспективным направлением по снижению расхода дорогостоящего цемента следует считать применение на БЗК мельниц ультратонкого измельчения фирм “Metso minerals”, ООО “БФК Инжиниринг”, ТОО “Казцинкмаш” для получения доизмельчения ДГШ до тонины 80 % содержания класса – 20 мкм (удельная поверхность 500 м²/кг) [7].

Для приготовления твердеющей закладки на Артемьевской шахте используют следующие компоненты: портландцемент марки 400 и зола уноса Аксуской ТЭС в качестве вяжущего, основным заполнителем для приготовления твердеющих закладочных смесей служат отвалыные породы Камышинского карьера и/или пустые породы от проходческих работ в шахте. Поставляемый на закладочный комплекс исходный инертный материал измельчается до крупности 20 мм, при этом содержание частиц крупнее 20 мм допускается не более 5 % по массе. В процессе приготовления закладочной смеси дробленный скальный материал измельчается в шаровой мельнице до крупности содержанием мелкого класса – 80 мкм не менее 25 % по массе и содержанием крупного класса + 2.5 мм не более 15 % по массе.

Составы закладочных смесей для БЗК-1 Артемьевской шахты с применением золы уноса Аксуской ТЭС приведены в табл. 1. Технологический процесс приготовления закладочных смесей на БЗК-1 в объеме 65 м³/ч на основе цементно-зольного вяжущего и дробленой породы заключается в следующем [8]. Дробленая порода крупностью – 15...+0 мм со склада (площадки) конвейером доставляется в расходные бункера. С расходного бункер-дозатора № 1 заполнитель подается в шаровую мельницу, с бункер-дозатора № 2 — в барабанный смеситель. Цемент и зола уноса из расходных силосов в дозированном виде поступают в репульпатор, где смешиваются с водой и в виде цементно-зольного молока (ЦЗМ) подаются в мельницу. Подача ЦЗМ в мельницу обоснована тем, что в случае его подачи в смеситель невозможно достигнуть требуемых плотностей ЦЗМ (1.3–1.5 т/м³) в репульпаторе и песчаной смеси (1.8–1.9 т/м³) в мельнице, при условии обеспечения требуемой плотности закладочной смеси (1.9–2.0 т/м³) в смесителе.

В мельнице происходит измельчение, активация и приготовление песчано-цементно-зольной пульпы (ПЦЗП), которая подается в трубчатый смеситель. В смесителе ПЦЗП перемешивается с крупной фракцией дробленой породы и готовится твердеющая закладочная смесь в объеме 65 м³/ч с гарантированным содержанием мелкого класса (фракции крупностью 0.08 мм) в объеме 30–35 %, среднего класса в объеме 50–55 % и крупного класса (фракции – 20... + 2.5 мм) в объеме 15 %. Из смесителя готовая закладочная смесь самотеком поступает в приемную воронку вертикального трубопровода и далее по закладочному бетоноводу — в выработанное пространство.

ТАБЛИЦА 1. Состав закладочных смесей для БЗК-1 с применением золы уноса Аксуской ТЭС

Система разработки	Назначение	Расход компонентов, кг/м ³				Плотность закладочной смеси, кг/м ³	Прочность закладочного массива, МПа
		Цемент	Вода	Зола уноса	Порода		
Слоевая восходящая	Основная закладка	75	415	300	1129	1920	$R^{28} = 1$
	Несущий слой	200	415	200	1147	1962	$R^{90} = 4$
Подэтажно-камерная	Основная закладка	100	410	200	1250	1960	$R^{90} = 2$
	Несущий слой	200	415	200	1147	1962	$R^{90} = 4$
Слоевая нисходящая	Дозаливка	75	415	300	1129	1920	$R^{28} = 1$

На Артемьевской шахте с целью снижения затрат на закладочные работы принято решение использовать в составе закладочных смесей вместо золы уноса молотые ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” или Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК). В соответствии с [9–11] для ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” установлены следующие показатели: сорт — 1, коэффициент качества — 1.68, влажность — 9.91. Анализ химического состава ДГШ выявил достаточно высокие массовые доли алюмосиликатов, %: CaO — 26.00, Al₂O₃ — 11.90, MgO — 6.37, SiO₂ — 33.84, TiO₂ — 0.70, MnO — 0.37.

Как известно [12, 13], твердение ДГШ начинается с растворения и гидролиза сульфидов, затем происходит адсорбция воды, сольватация нерастворимых силикатов, алюмосиликатов кальция и гидролиз продуктов сольватации. После того как в системе образовалось достаточное количество полупроницаемых коллоидных пленок, процесс твердения идет так же, как и в цементах.

Тонкость помола ДГШ (его удельная поверхность) является основным параметром, который определяет прочностные характеристики закладки [14–16]. Ультратонкое измельчение ДГШ позволяет сократить удельный расход портландцемента М400 на 40 кг/м³ и ДГШ на 60 кг/м³ при сохранении прочностных характеристик сформированных закладочных массивов.

На основе лабораторных испытаний для БЗК строящегося Ново-Лениногорского рудника, выемку запасов руд которого предусматривается осуществлять в зависимости от горно-геологических условий как системой горизонтальных слоев с закладкой в восходящем или нисходящем порядке (удельный вес данной системы 10 %), так и подэтажно-камерной системой разработки с закладкой в восходящем или нисходящем порядке (удельный вес данной системы 90 %), приняты два состава закладочных смесей:

— при ультратонком помоле ДГШ до 80 % класса – 20 мкм (с доизмельчением в мельнице ультратонкого помола), кг/м³: портландцемент М400 — 10, тонкомолотый ДГШ — 190, заполнитель — 1375, в том числе измельченная порода — 600; вода — 420;

— при тонине помола ДГШ до 70 % класса – 80 мкм (измельчение только в мельнице МШЦ), кг/м³: портландцемент М400 — 50, молотый ДГШ — 250, заполнитель — 1200, в том числе измельченная порода — 600; вода — 450.

Приведенные составы обеспечивают в лабораторных условиях достижение нормативной прочности закладки на уровне 2.0 МПа в 28-суточном возрасте и 3.5 МПа — в 90-суточном. Однако опытно-промышленные испытания технологии закладочных работ с ультратонким

помолом на Ново-Лениногорском руднике ДГШ не проводились, в связи с чем оценить предложенную технологию при системе горизонтальных слоев весьма затруднительно. Одним из способов снижения расхода вяжущего материала можно считать увеличение его дисперсности. Однако в настоящее время недостаточно изучено изменение структуры и прочности твердеющей закладки с увеличением удельной поверхности частиц вяжущего материала. С целью оценки технологии закладочных работ с применением молотых ДГШ на Артемьевской шахте при системе горизонтальных слоев необходимо было на основе лабораторных испытаний выявить прочностные характеристики и реологические свойства закладки различных составов, затем на основе обоснованного выбора рациональных составов смесей провести опытно-промышленные испытания на БЗК Артемьевской шахты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Оптимальный гранулометрический состав смеси, удовлетворяющий требованиям транспортабельности смеси по трубопроводам и нормативной прочности, должен находиться в следующих пределах: фракция $-15... +2.5$ мм — 10–15 %; фракция $-2.5... +0.08$ мм — 55–60 %; фракция -0.08 мм — 30–35 %. Соблюдение этих условий обеспечивает высокую подвижность и связность, необходимую для транспортирования смесей по трубам и укладки их в выработанное пространство, а также формирование массива с относительно однородной структурой и требуемыми прочностными характеристиками.

При проведении лабораторных исследований в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете и специализированной лаборатории ТОО “Казцинк” измельчение ДГШ осуществлялось до класса -80 мкм — 50 % по объему (табл. 2). На основании результатов проведенных лабораторных испытаний рекомендованы к опытно-промышленным испытаниям следующие составы закладочных смесей:

— при необходимой нормативной прочности в возрасте 28 сут $R^{28} = 1.5 - 2.0$ МПа, кг/м³: портландцемент ПЦ М400-Д20 — 65; молотый ДГШ — 260; лежалые хвосты — 600; дробленая порода — 384; вода — 523 при подвижности смеси по осадке конуса СтройЦНИЛа — 12.7 см и достигнутой кубиковой прочности 2.42 МПа;

— при необходимой нормативной прочности в возрасте 90 сут $R^{90} = 4.0$ МПа, кг/м³: портландцемент ПЦ М400-Д20 — 85; молотый ДГШ — 260; дробленая порода — 1076; вода — 465 кг/м³ при подвижности смеси по осадке конуса СтройЦНИЛа — 15 см, расплыве по цилиндру Суттарда 22 см и достигнутой кубиковой прочности 4.1 МПа или портландцемент ПЦ М400-Д20 — 75; молотый ДГШ — 286; дробленая порода — 1100; вода — 450 при достигнутой кубиковой прочности 4.3 МПа.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав инертного заполнителя и молотых ДГШ при проведении лабораторных исследований, %

Материал	Частные остатки на ситах, мм												
	20	15	10	5	2.5	1.25	1.0	0.63	0.315	0.16	0.14	0.08	-0.08
ДГШ исходный	—	—	2.71	5.77	9.34	28.78	—	29.77	17.65	—	4.43	0.80	0.75
ДГШ измельченный	—	—	—	—	—	—	0.03	0.02	2.07	—	25.86	21.98	50.04
Дробленая порода	—	—	—	0.10	27.26	14.71	—	17.31	13.53	8.88	—	9.64	8.53

РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАНШЛАКОВ В САМОТЕЧНОМ РЕЖИМЕ

Кроме прочности, в результате твердения закладочные смеси должны позволять транспортировку по трубам на значительные расстояния. Ниже приведена методика расчета параметров трубопроводного транспорта закладочной смеси. Для расчета отобраны составы с различными заполнителями, отвечающие следующим требованиям: подвижность смеси по осадке конуса — не ниже 11 см, прочность закладки в возрасте 14 сут — не ниже 2.0 МПа.

Исходные данные для расчета: производительность БЗК — 114 м³/ч, расстояние транспортирования по вертикальному участку — 575 м, по горизонтальному участку — 3220 м, плотность компонентов закладочной смеси, кг/м³: шлакопортландцемента — 3100, ДГШ — 2800, флотационные хвосты — 2770, порода — 2600, вода — 1000.

Для расчета принят состав закладочной смеси, кг/м³: шлакопортландцемент — 65, ДГШ — 260, флотационные хвосты — 600, порода — 450, вода — 500 и добавка пластификатора Pozzolit MR 55 — 1.0 л/м³.

Гранулометрический состав готовой закладочной смеси (после измельчения в шаровой мельнице) по аналогии с действующими БЗК (Малеевский и Тишинский рудники) принят следующим: 0.08 мм — 55.17 %; 0.08–0.16 мм — 10.93 %; 0.016–0.315 мм — 8.25 %; 0.315–0.63 мм — 11.82 %; 0.63–1.25 мм — 6.41 %; 1.25–2.5 мм — 7.42 %; +2.5 мм — 4.28 %. Реологические характеристики закладочной смеси: подвижность — 12.7 см, предельное напряжение сдвига — 190 Па, динамическая вязкость — 0.027 Н·с/м².

Средняя плотность твердых фракций (цемента, ДГШ и заполнителя), содержащихся в 1 м³ закладочной смеси, составила $\rho = 2750$ кг/м³. Объемная концентрация или объемное содержание твердого в плотном виде смеси $S_1 = 0.5$. Объемное содержание твердых частиц (тонких, мелких и крупных фракций) для закладочной смеси равно соответственно 0.33; 0.17 и 0.021.

Тогда плотность закладочной смеси (условная) составит: $\rho_{см} = (\rho - \rho_o)S_1 + \rho_o = 1875$ кг/м³, где $\rho_o = 1000$ кг/м³ — плотность воды. Плотность несущей среды, образованной тонкодисперсными фракциями: $\rho_{см} = (\rho - \rho_o)S_1 + \rho_o = 1578$ кг/м³. Относительная плотность твердого: $a = (\rho - \rho_o) / \rho_o = 1.75$. Относительная плотность твердого в несущей среде плотностью ρ_1 : $a_1 = (\rho - \rho_1) / \rho_1 = 0.74$. Средневзвешенная крупность мелких частиц $\Delta = \sum_{i=1}^{i=n} d_i q_i / \sum_{i=1}^{i=n} q_i = 0.81$.

Гидравлическая крупность (скорость осаждения) мелких фракций в стесненных условиях несущей среды: $U = \beta a_1 \Delta \cdot 10^{-3} / \sqrt[3]{\mu} = 0.006$ м/с, где β — эмпирический коэффициент при $\Delta = 0.5 - 1.5$ мм; $\beta = 6.5$, $\mu = 0.027$ Н·с/м² — динамический коэффициент вязкости несущей среды.

Режим транспортирования закладочной смеси в тонкодисперсной несущей среде: $\mathcal{G}_{кр} = C \sqrt[3]{a_1 S_2 U g D_{вн}} + C_1 \sqrt{a_1 S_3 U g D_{вн}} = 1.49$ м/с, где $C = 7 - 12$ и $C_1 = 3 - 5$ — эмпирические коэффициенты; $D_{вн} = 0.132$ м — внутренний диаметр трубопровода.

Рабочая скорость движения закладочной смеси по транспортному трубопроводу: $\mathcal{G}_p = K 4Q / \pi D_{вн}^2 3600 = 2.66$ м/с, где $K = 1.15$ — коэффициент, учитывающий увеличение расхода смеси за счет аэрации в вертикальном ставе. При меньшей скорости возможно значительное расслоение смеси, что еще более усугубляется отсутствием в составе закладочной смеси золы уноса.

Для наблюдения устойчивого режима движения закладочной смеси значение \mathcal{G}_p должно быть больше $\mathcal{G}_{кр}$, в нашем случае это условие соблюдается. Коэффициент запаса $K_{зап} = \mathcal{G}_p / \mathcal{G}_{кр} = 1.78$. Удельные потери напора: $i = i_0 + C'\Delta S = 0.177$ м/м, где i_0 — удельное сопротивление движению чистой воды, $i_0 = 0.00107 \cdot \mathcal{G}_p^2 / \sqrt[3]{D_{вн}} = 0.015$ м/с; $C' = 0.4$ — эмпирический коэффициент; $S = 0.5$ — объемная концентрация или объемное содержание твердого в плотном виде смеси.

Дальность транспортирования закладочной смеси по горизонтальному трубопроводу (при условии полного заполнения вертикального става и автоматизации транспортной системы) составит: $L_{гор} = H_B K' (\rho_{см} / \rho_o - i) / (K_2 K_3 i) = 3223$ м, где $H_B = 575$ м — длина вертикального става; $K' = 0.85 - 0.9$ — коэффициент заполнения вертикального става закладочной смесью; $K_2 = 1.4 - 1.5$ — коэффициент надежности транспортной системы (наличие автоматизации); $K_3 = 1.1 - 1.2$ — коэффициент, учитывающий местные сопротивления.

При необходимости подачи закладки на большие расстояния возможно применение схемы подачи смеси в самотечно-пневматическом режиме. Внутренний диаметр пневмоврезки для подачи сжатого воздуха в транспортный трубопровод (бетоновод) определится из выражения $d_{н.с} = 0.16 D_{вн} K_n \sqrt{\mathcal{G}_{nm} / \sqrt{P}} = 0.0133 \approx 13$ мм, где $K_n = 1.5 - 1.8$ — коэффициент неравномерности состава закладочной смеси; $\mathcal{G}_{nm} = 4 - 6$ м/с — средняя скорость закладочной смеси при пневмотранспорте; $P = 650$ кПа — давление сжатого воздуха в шахтной магистрали.

Увеличение скорости выше указанной может привести к усиленному износу труб. Удельный расход сжатого воздуха при транспортировании 1 м^3 закладочной смеси составит: $Q_v = 0.79 \mathcal{G}_{nm} L_{нв} D_{вн}^2 (1 + K' K_3 L_{пор} (0.1 \tau_o) / D_{вн}) = 29.32 \text{ м}^3 / \text{м}^3$, где $K' = 0.00078$ — коэффициент пропорциональности; $K_3 = 1.03 - 1.15$ — коэффициент, учитывающий увеличение давления для поддержания движения закладочной смеси по трубопроводу; $L_{нв} = 100 - 120$ м — расстояние между порциями смеси в трубопроводе; $L_{пор} = 15 - 25$ м — длина образовавшейся в трубопроводе порции смеси; $\mathcal{G}_{nm} = 2 - 6$ м/с — скорость движения смеси на пневмоучастке; $\tau_o = 190$ Па — предельное напряжение сдвига.

Выполненные расчеты подтвердили возможность транспортирования закладочных смесей на основе цементно-шлакового вяжущего по горизонтальному участку в самотечном режиме на расстояние 3200 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения опытно-промышленных испытаний технологии закладочных работ с применением ДГШ аппаратурно-технологическая схема БЗК-2 была незначительно изменена, добавлены гидроциклоны (ГЦ) и центробежный насос. Так как цементу присуща большая активность, чем ДГШ, последний должен подвергаться более тонкому помолу для большего проявления своих гидравлических свойств. С целью сохранения гидравлического потенциала шлака необходимо применять раздельный помол компонентов в соответствии с их реакционной способностью, т. е. получать тем более крупный продукт, чем выше его реакционная способность [17]. Поэтому ДГШ в ходе опытно-промышленных испытаний измельчался раздельно на БЗК-2 в мельнице МШР 2700×3600 с дозированной подачей в нее дополнительной воды до тонины помола 50 % содержания класса – 80 мкм, а затем подавался на БЗК-1 в мельницу МШР 3600×4000 , где происходило измельчение

дробленной породы, а также осуществлялась дезинтеграция шламистых агрегатов мелкого заполнителя, интенсивное перемешивание всех компонентов закладки и приготовление гомогенной смеси высокой плотности.

Транспортировка ДГШ в приемный бункер на БЗК-2 проводилась с технологической площадки склада ДГШ при помощи бульдозера. Подаваемый ДГШ предварительно отсеивался через грохот с ячейками 150×150 мм, установленный над приемным бункером. Некондиционный ДГШ (не прошедший сквозь грохот) складировался в отвал отходов, подрешетный продукт поступал в приемный бункер. ДГШ, просеянный через грохот, поступал на ленточный конвейер и далее транспортировался по нему в приемную воронку мельницы МШР 2700×3600 . Транспортировка ДГШ от слива мельницы БЗК-2 в мельницу МШР 3600×4000 осуществлялась при помощи центробежного насоса.

Количество подаваемого ДГШ в мельницу контролировалось с помощью весов, установленных на ленточном конвейере БЗК-2, и регулировалось при помощи преобразователя частоты вращения ленточного конвейера БЗК-2 в соответствии с технологической картой состава закладочной смеси. Отсев измельченного ДГШ крупнее класса -0.08 мм выполнялся с помощью гидроциклона. Недоизмельченный ДГШ (в виде пульпы) при помощи центробежного насоса подавался обратно в мельницу МШР 2700×3600 . Измельченный ДГШ в мельнице до класса -0.08 мм не менее 50 % по массе из мельницы МШР 2700×3600 самотеком поступал в накопительную емкость и уже оттуда при помощи центробежного насоса подавался в мельницу МШР 3600×4000 .

В ходе опытно-промышленных испытаний закладочных работ на Артемьевской шахте проводилось формирование несущего слоя заходки 61 (1-й участок, 11-й горизонт, отметка -300 м) с объемом выработанного пространства 272 м^3 . В процессе испытаний заливались контрольные образцы-кубики различного состава смесей с расходом вяжущего: шлакопортландцемента — $50 - 200 \text{ кг/м}^3$, измельченного в мельнице МШР 2700×3600 ДГШ — $150 - 330 \text{ кг/м}^3$.

Установлена тонина помола ДГШ: на разгрузке из мельницы МШР 2700×3600 (при доле твердого $49.8 - 55.4\%$) содержание класса $-80 + 44$ мкм — $6.1 - 6.7\%$, класса -44 мкм — $22.2 - 23.3\%$; на сливе из ГЦ (при доле твердого $22.1 - 39.2\%$) содержание класса $-80 + 44$ мкм — $6.6 - 7.7\%$, класса -44 мкм — $28.3 - 43.9\%$; в песках ГЦ (при доле твердого $54.0 - 67.6\%$) содержание класса $-80 + 44$ мкм — $2.4 - 5.6\%$, класса -44 мкм — $13.1 - 18.3\%$. Таким образом, содержание класса -80 мкм в измельченных ДГШ на сливе из ГЦ достигало значений $34.9 - 51.6\%$ (табл. 3).

Анализ прочностных характеристик контрольных образцов-кубиков показал, что при составах смесей с расходом цемента около $65 - 85 \text{ кг/м}^3$ и ДГШ — $260 - 280 \text{ кг/м}^3$ (при тонине помола 80 % класса -50 мкм) заявленные по результатам лабораторных испытаний прочностные и реологические характеристики закладки не подтверждаются, т.е. использование данных составов не позволит сформировать в шахте закладочные массивы необходимой прочности.

В ходе опытно-промышленных испытаний установлено, что мельница МШР 2700×3600 в открытом цикле может обеспечить производительность по ДГШ с тониной помола 50 % класса -80 мкм на уровне 21 т/ч. Данная мельница в замкнутом цикле помола с классификацией в ГЦ обеспечит повышенную (примерно на 40 %) производительность по ДГШ с приведенной характеристикой до 30 т/ч. Однако система помола ДГШ в мельнице в открытом цикле весьма инерционна, и выход на номинальный режим измельчения ДГШ, по данным практики на БЗК Тишинского рудника, происходит примерно через 30–40 мин после запуска промытой мельницы. Еще более инерционной является система замкнутого цикла помола, набор и стабилизация циркуляционной нагрузки происходит более чем через 60 мин после запуска мельницы.

ТАБЛИЦА 3. Гранулометрический состав продуктов измельчения при опытно-промышленных испытаниях на складочном комплексе Артемьевской шахты

Материал, место отбора	Доля твердого, %	Выход, %											
		-15...+10	-10...+5	-5...+2.5	-2.5...+1.0	-1.0...+0.63	-0.63...+0.3	-0.3...+0.2	-0.2...+0.1	-0.1...+0.074	-0.074...+0.044	-0.044	-0.0074
По данным испытательной лаборатории Николаевской обогатительной фабрики													
Конвейер	—	1.7	10.9	34.5	15.2	10.1	21.1	1.9	1.7	0.4	2.5	2.9	
Разгрузка МШЦ 2700 × 3600	4.8 – 55.4	—	—	2.4 – 2.8	2.6 – 3.0	0.3 – 0.4	25.8 – 29.9	17.6 – 24.6	13.8 – 18.5	6.1 – 6.7	22.2 – 23.3	28.3 – 30.0	
Слив ГЦ	22.1 – 39.2	—	—	5.0 – 15.5	2.4 – 5.6	0.4 – 4.4	9.2 – 21.8	6.5 – 19.0	11.2 – 12.5	6.6 – 7.7	28.3 – 43.9	34.9 – 51.6	
Пески ГЦ	54.0 – 67.6	—	—	1.5 – 2.2	2.3 – 3.0	1.7 – 4.9	26.3 – 31.1	24.1 – 28.5	14.7 – 20.3	2.4 – 5.6	13.1 – 18.3	18.7 – 20.7	
По данным отдела технического контроля БЭК Артемьевской шахты													
Конвейер	—	26.74					49.9			23.4		23.4	23.4
Разгрузка МШЦ 2700 × 3600	—				78.0					22.0		22.0	22.0
Слив ГЦ	—				54.0					46.0		46.0	46.0
Пески ГЦ	—				69.0					31.0		31.0	31.0
Закладочная смесь		3.65	2.5	4.04	5.4	5.2	55.2			29.2		29.2	29.2

Низкие показатели прочности закладки при испытаниях на БЗК Артемьевской шахты связаны с пониженным удельным расходом измельченного класса – 80 мкм ДГШ в смеси. В слив гидроциклона первоначально поступает только небольшая доля от загруженного в мельницу ДГШ, остальное возвращается в мельницу в виде циркуляционной нагрузки. Удельный расход молотого ДГШ на 1 м^3 смеси в начале работы мельницы будет крайне незначителен, поэтому критично применять данную технологию для закладки слоевых выработок малого объема. Расчеты, проведенные по методике [18], показывают, что размеры мелющих тел должны быть равны 48 мм, масса загрузки шаров — 29.38 т. Применение более крупных шаров снижает тонины помола ДГШ. В настоящее время размер шаров в мельнице МШР 2700×3600 равен 100 мм. Как известно, ДГШ набирает прочность медленнее, чем портландцемент, а интенсивный набор прочности закладки с молотыми ДГШ происходит в возрасте более 14 сут. Однако, согласно рис. 1, интенсивный набор прочности закладки с ДГШ при тонине помола до 52 % класса – 80 мкм происходил через 28 сут, при тонине помола 80 % зависимость набора прочности от времени твердения имела более сглаженную форму. Испытания, проведенные на БЗК Артемьевской шахты, показали прирост прочности закладки в 28-суточном возрасте в 2 раза (1.35–2.86 МПа) при изменении тонины помола класса – 0.08 мм с объема 52 на 80 %, в 90-суточном — в 1.5 раза.

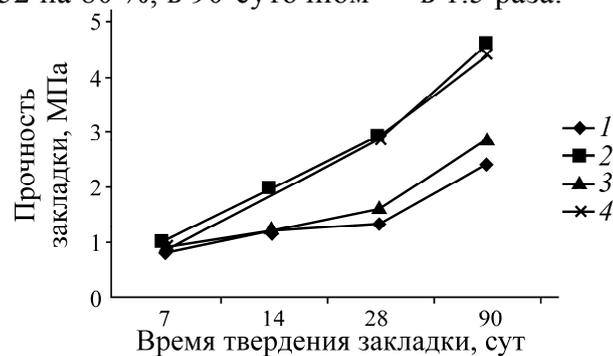


Рис. 1. Зависимость прочности закладки от расхода и степени измельчения ДГШ: 1 — при расходе цемента 148 кг/м^3 , ДГШ — 198 кг/м^3 и тонине помола ДГШ до 52 % класса – 80 мкм; 2 — при том же расходе вяжущих и тонине помола ДГШ 80 % класса – 80 мкм; 3 — при расходе цемента 197 кг/м^3 , ДГШ — 147 кг/м^3 и тонине помола ДГШ до 52 % класса – 80 мкм; 4 — при том же расходе вяжущих и тонине помола ДГШ 80 % класса – 80 мкм

В [19–21] максимальное измельчение шлака и известняка рекомендуется до удельной поверхности $450\text{--}650 \text{ м}^2/\text{кг}$ в связи с медленным шагом набора прочности свыше указанного предела. Такая тонкость помола является наиболее рациональной с точки зрения затрат энергии на измельчение [22]. Таким образом, для достижения нормативных прочностных показателей закладки и сохранения ее реологических свойств с экономической и технологической точек зрения целесообразно измельчать ДГШ до тонины помола 80 % класса – 80 мкм. Изучено влияние молотых ДГШ при тонине помола 80 % класса – 80 мкм различных производителей на прочностные характеристики закладки. Для проведения лабораторных исследований ДГШ и порода от проходческих работ подвергались механическому измельчению: ДГШ производства ЗСМК — 85.2 % содержания класса – 80 мкм, в том числе 67.1 % — класса – 44 мкм; ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” — 81.4 % содержания класса – 80 мкм, в том числе 67.8 % — класса – 44 мкм. В различных составах смесей изменяли расход цемента с 50 до 196 кг/м^3 . Расход ДГШ составлял около 300 кг/м^3 , измельченной породы до класса

– 5 мм — 1000–1100 кг/м³. При расходе воды 480 л/м³ значение расплыва смеси по цилиндру Суттарда составляло 20.0–28.5 см, т. е. транспортабельные свойства закладочных смесей удовлетворяли технологии ведения закладочных работ.

В результате испытания образцов твердеющей закладки на одноосное сжатие установлена зависимость прочности твердеющей закладки от расхода цемента при расходе ДГШ 300 кг/м³, измельченных до класса – 80 мкм в объеме 80 % (рис. 2). Отмечается ускоренный набор прочности контрольных образцов с ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” в ранние сроки. На 28-е сутки прочность образцов с ДГШ производства ЗСМК становится выше, чем у образцов с ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” и к возрасту 90 сут разрыв в значениях прочности увеличивается. Возможно, это связано с тем, что водопотребность ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” гораздо выше, чем у ДГШ производства ЗСМК, а, как известно, количество воды, необходимой для нормальной консистенции цементного раствора, обратно пропорционально количеству введенного шлака.

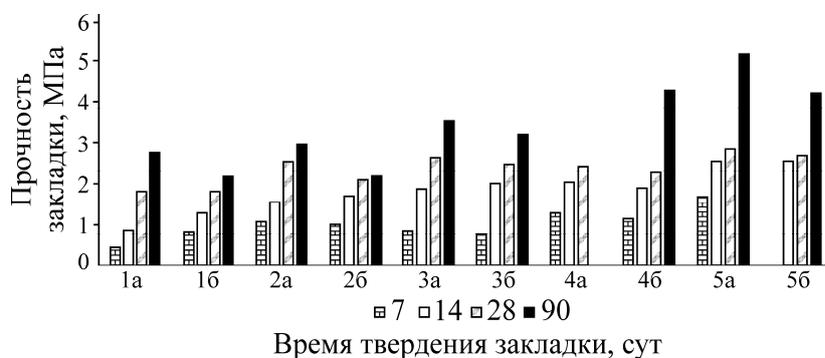


Рис. 2. Зависимость прочности твердеющей закладки от расхода цемента (при расходе ДГШ 300 кг/м³ различных производителей, измельченных до класса – 80 мкм в объеме 80 %): 1–5 — расход цемента соответственно 50, 73, 97, 147 и 196 кг/м³; а — смеси с ДГШ производства ЗСМК; б — смеси с ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау”

Проведем ориентировочный расчет затрат на вяжущее при формировании несущего слоя и использовании составов закладки с золой уноса и ДГШ. Годовая производительность рудника по добыче руды в [23] принята 1500 тыс. т в год. В настоящее время суммарная техническая производительность БЗК-1 и БЗК-2 на Артемьевской шахте равна 105 м³/ч или 310 тыс. м³/год. Согласно [8], несущий слой прочностью 4 МПа в 90-суточном возрасте формируется при поэтажно-камерной и слоевой системе разработки с нисходящей выемкой. Высота несущего слоя при нисходящей слоевой выемке составляет 1.5 м (37.5 % от объема слоя), при поэтажно-камерной — 4.0 м (23.5 % от объема слоя). Удельный вес поэтажно-камерной системы разработки в [23] принят 19 %, слоевой с нисходящей выемкой — 40 %. При средней плотности руд месторождения 3.79 т/м³ необходимые объемы закладки для формирования несущего слоя составят: при слоевой системе с нисходящей выемкой — 59 тыс. м³/год, при поэтажно-камерной — 17.6 или суммарно по системам разработки — 76.6 тыс. м³/год.

Для сравнения примем составы закладочной смеси с золой уноса и ДГШ. Состав смеси с золой уноса, кг/м³ (при достижении прочности в 90-суточном возрасте 4 МПа): цемент – 200, вода — 415, зола уноса — 200, порода — 1147. Плотность смеси 1962 кг/м³. Состав смеси с ДГШ производства ЗСМК (тонина помола 80% класса – 80 мкм), кг/м³ (при достижении прочности в 90-суточном возрасте 4.4 МПа): цемент — 147, вода — 481, ДГШ — 245, поро-

да — 1030. Плотность смеси 1949 кг/м³, расплыв смеси на цилиндре Суттарда — 22 см. При стоимости вяжущих, долл. США/т: цемента — 43.1; золы уноса — 12.69 и ДГШ — 4.55 затраты на вяжущее при составе смеси с золой уноса составят 11.17 долл. США/м³, с ДГШ — 7.45 долл. США/м³. С учетом годового объема закладочной смеси для формирования несущего слоя экономия от применения ДГШ будет равна 285 тыс. долл. США/год.

ВЫВОДЫ

На основании лабораторных испытаний на БЗК Артемьевской шахты установлен прирост прочности закладки в 28-суточном возрасте в 2 раза, в 90-суточном — в 1.5 раза. Выявлено, что интенсивный набор прочности закладки с ДГШ при тонине помола до 52 % класса – 80 мкм происходит через 28 сут, при тонине помола 80 % зависимость набора прочности от времени твердения имеет более сглаженную форму.

Выявлены рациональные составы закладочных смесей, обеспечивающие достижение нормативной прочности закладочного массива, с применением ДГШ при тонине помола до 80 % класса – 80 мкм.

Установлен ускоренный набор прочности контрольных образцов с ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” в ранние сроки по сравнению с ДГШ производства ЗСМК. После 28-суточного возраста прочность на одноосное сжатие образцов закладки с ДГШ производства ЗСМК становится выше, чем у образцов с ДГШ производства АО “АрселорМиттал Темиртау” и к возрасту 90 сут разрыв в значениях прочности только увеличивается.

Выполненные расчеты подтвердили возможность транспортирования закладочных смесей с использованием цементно-шлакового вяжущего при подвижности смеси по осадке конуса СтройЦНИЛа 11 см для условий Артемьевской шахты по горизонтальному участку в самотечном режиме на расстояние 3200 м.

При годовом объеме закладочных работ по формированию несущего слоя на Артемьевской шахте с использованием цементно-шлакового вяжущего по сравнению с цементно-зольным экономия от применения ДГШ составит 285 тыс. долл. США/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen G. Y. and Huang W. H.** Investigation on blending CFB ash with blast furnace slag as replacement for Portland cement used in concrete binders, *Adv. Mater. Res.*, 2013, Vol. 723. — P. 623–629.
2. **Hu S. G., Lu X. J., Niu H. L., and Jin Z. Q.** Research on preparation and properties of backfilling cementation material based on blast furnace slag, *Adv. Mater. Res.*, 2011, Vol. 158. — P. 189–196.
3. **Wu M., Hu X., Zhang Q., Cheng W., Hu Z.** Orthogonal experimental studies on preparation of mine-filling materials from carbide slag, granulated blast-furnace slag, fly ash, and flue-gas desulphurisation gypsum, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, Vol. 2018, Article ID 4173520P.
4. **Черниговский А. И.** Внедрение новых технологий в производство бетонных изделий с целью экономии энергии и цемента // ЖБИ и конструкции. — 2010. — № 2. — С. 50–58.
5. **Битимбаев М. Ж., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н.** Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых, Ассоц. вузов Республики Казахстан. — Алматы: ТОО РПИК “Dayir”, 2012. — 624 с.
6. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К.** Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 95–105.
7. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Разработка технологии закладочных работ на проектируемом Ново-Лениногорском руднике // ГИАБ. — 2015. — № 8. — С. 25–32.

8. **Технологическая инструкция** (технологический регламент) по производству закладочных работ на БЗК 1, 2 и 3 для условий Артемьевского рудника: ДГП “ВНИИцветмет”. — Усть-Каменогорск, 2010. — 84 с.
9. **ГОСТ 25818-91**. Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия (с изменением № 1). — Введен 01.07.91.
10. **ГОСТ 3476-74**. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цемента / Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1974. — Введен 01.01.75.
11. **СТО СМК 09.90.19**. Шлак доменный гранулированный молотый, 2013.
12. **Кравченко В. П., Струтинский В. А.** Гидравлическая активность доменных шлаков // *Сталь*. — 2007. — № 1. — С. 94–95.
13. **Хоботова Э. Б., Калмыкова Ю. С.** Отвальный доменный шлак как сырьевой компонент производства вяжущих веществ // *Экология и пром-сть*. — 2011. — № 1. — С. 35–40.
14. **Deng D. Q., Liu L., Yao Z. L., Song K. I., and Lao D. Z.** A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine, *J. Environ. Manage*, 2017, Vol. 196. — P. 100–109.
15. **Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., and Zhou M.** Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill, *Constr. Build. Mater.*, 2016, Vol. 126. — P. 345–350.
16. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Нуршайыкова Г. Т., Тунгушбаева З. К.** Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 1. — С. 84–91.
17. **Тейлор К.** Химия цемента. — М.: Мир, 1996. — 559 с.
18. **Разумов К. А.** Кинетика измельчения разнопрочных компонентов // *Горн. журн.* — 1947. — № 3. — С. 34–38.
19. **Петлеваный М. В.** Повышение устойчивости закладочного массива из твердеющей закладки при добыче руды на глубоких горизонтах // *Геотехническая механика: сб. тр.* — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. — Вып. 98. — С. 287–296.
20. **Гальцева Н. А.** Эффективные закладочные смеси на основе синтетического ангидрита: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017. — 185 с.
21. **Светкина Е. Ю., Петлеваный М. В.** Закономерности формирования структуры и прочности твердеющей закладки при разной дисперсности вяжущего материала // *Сб. науч. тр.* — Днепр: НГУ, 2012. — № 37. — С. 80–87.
22. **Должиков П. Н., Семирягин С. В., Фурдей П. Г.** Исследование влияния дисперсности гранулированного доменного шлака на прочность цемента // *Сб. науч. тр.*, Донецк: ДонГТУ, 2013. — № 39. — С. 165–169.
23. **Проект** промышленной разработки Артемьевского месторождения. — Усть-Каменогорск: ТОО “Казгипроцветмет”, 2016.

Поступила в редакцию 01/XI 2018

После доработки 26/I 2019

Принята к публикации 29/I 2019