

УДК 624.151.2

д.т.н. Должиков П. Н.,

к.т.н. Фурдей П. Г.

(ООО "Славсант", г. Павлоград, Украина, e-mail: pfurdey@gmail.com)

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕСЦЕМЕНТНЫХ ТАМПОНАЖНО-ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ НА БАЗЕ ОТВАЛЬНЫХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

В исследовании представлено обоснование бесцементной вязкопластичной рецептуры закладочных смесей с использованием доменных отвальных шлаков. Доказано, что шлакоглинистые суспензии обладают вязкопластичными свойствами и подчиняются деформационному поведению тела Шведова-Бингама.

Ключевые слова: отвальный доменный шлак, утилизация, выработанное пространство, тампонажно-закладочная смесь, шлакоглинистые суспензии, реологические свойства, пластическая прочность.

Решение экологических проблем промышленно развитых регионов Украины заключается, прежде всего, в утилизации отходов и использованию ресурсосберегающих технологий в строительстве и горном деле. Массовое вовлечение крупных шлаковых и породных отвалов различных отраслей промышленности в производство строительных материалов становится сегодня одной из особенностей строительного материаловедения. Решение этой проблемы позволит получать не только высокие экономические эффекты за счет рационального использования цемента, но и имеет огромное природоохранное значение [1].

Одним из направлений решения этой задачи являются расширение производства и применение в строительстве эффективных материалов и изделий на основе вторичных минеральных ресурсов. Это обусловлено широким распространением и дешевизной твердых отходов и шлаков металлургической и угольной промышленности на территории Донбасса, простотой их переработки, высокой эффективностью и технологичностью [2, 4].

Однако широкое применение техногенных отходов сдерживается определенной нестабильностью и неоднородностью многих побочных продуктов промышленности, что, в свою очередь, может привести к

снижению качества строительной продукции. На изменчивость свойств отходов промышленности оказывают влияние не только условия их образования, но также химико-минералогический состав, условия и длительность хранения в отвалах и шламонакопителях. Известно, например, что отвальные породы имеют значительную неоднородную усадку вследствие неоднородного гранулометрического состава и низкой прочности перегоревшего материала. Это приводит к деформациям и разрушениям конструкций, сужению области технологического применения отвальных пород и шлаков [1, 2, 4].

Одним из перспективных направлений использования тонкодисперсных шлаков и измельченных отвальных пород является применение их в качестве активаторов твердения и наполнителей в производстве цементных, композиционных строительных растворов и тампонажно-закладочных смесей. В качестве промышленных отходов используемых в тампонажно-закладочных смесях, применяются горелые и негорелые породы, шламы обогатительных фабрик, золы уноса ТЭС, а также отвальные шлаки металлургической промышленности [2]. Возможность использо-

вания в растворах отвального доменного шлака в качестве базового сырья аргументировано тем, что он включает широкий спектр минералов, в том числе гидравлически активных, что позволяет использовать шлак в качестве основного компонента закладочной смеси без потери гидравлической активности [3].

Главной **целью** проведенных экспериментов является обоснование бесцементной вязкопластичной рецептуры закладочных смесей с использованием доменных отвальных шлаков Алчевского металлургического комбината.

Отобранный для исследований доменный отвальный шлак был высушен в сушильном шкафу в течение 5 часов. Для использования, как базовое вещество в суспензии, шлак подвергался помолу в шаровой мельнице. Перед началом помола просушенный шлак просеивали через сито 2,5 см. Помол доменного отвального шлака проводился в течение 5 часов. Таким образом полученная удельная поверхность перемолотого материала примерно равна тонкости помола цемента и составляет 4022 см²/г.

С помощью индикаторов уровня pH был установлен уровень pH использованного шлака, который составляет приблизительно 10, и классифицирует данный шлак как основной.

В качестве вяжущего при затворении закладочных суспензий использовался цемент марки ПЦ П/А-III-500 – портландцемент с добавлением шлака 6–20%.

В качестве примеси для повышения вязкости раствора использовалась огнеупорная молотая глина. Как затворитель использовалась водопроводная вода.

Для оптимизации рецептуры закладочного раствора с необходимыми физическими и технологическими свойствами предварительно на стадии проектирования были составлены пропорции компонентов раствора. Основными параметрами, которыми руководствовались при подборе оптимальной рецептуры, были: минимальное содержание цемента при максимально

возможном использовании отхода металлургического производства (отвального шлака). Свойства закладочных смесей в полной мере зависят от свойств компонентов, входящих в их состав, и их количественного соотношения, т.е. шлака и глины.

Для исследований реологических свойств тампонажно-закладочных шлаковых смесей использовался ротационный вискозиметр Reotest-1. Методика изучения деформационного поведения образцов шлакоглинистых суспензий хорошо известна и достаточно полно изложена в работах [1, 3].

Известно, что глинистые растворы обладают повышенной вязкостью и собственной структурой для удержания шлаковых частиц во взвешенном состоянии. При этом глина очень хорошо осмотически связывает воду, способствуя структуризации суспензии [3]. Допустимая доля шлаковых частиц в глинистом растворе определяется плотностью смеси. В общем случае можно записать:

$$\gamma = \frac{V_z \gamma_z + V_{ш} \rho_{ш}}{V_z + V_{ш}}, \quad (1)$$

где V_z и $V_{ш}$ – объемы глинистого раствора и шлака.

Обозначив объемную долю шлака в глинистом растворе как $n_{ш} = \frac{V_{ш}}{V_z}$, массовое содержание шлака в суспензии будет равно:

$$m_{ш} = \frac{\gamma - \gamma_z}{1 - \frac{\gamma}{\rho_{ш}}} V_z, \quad (2)$$

где $\rho_{ш}$ – плотность шлака;

γ_z – плотность глинистого раствора.

Полученная формула позволяет на стадии проектирования выбирать оптимальную рецептуру шлакоглинистой суспензии.

Таким образом, в данных исследованиях необходимо было определение зависимости пластической прочности и реологи-

ческих свойств тампонажно-закладочной смеси от количества шлака и глины. Поэтому разработка рецептуры проведена по методике планирования полнофакторного эксперимента при варьировании факторов на двух уровнях [3].

Рецептура готовилась в следующей последовательности: сначала приготавливали молотый шлак, в глину затем заливали воду, а после в полученный раствор вводили шлак и при необходимости добавляли цемент. Разработка рецептуры закладочных суспензий включала исследования при различном содержании шлаков, цемента и глины. При этом количество цемента выдерживали в минимально необходимых пределах. Введение глины обусловлено повышением вязкости раствора. Образцы суспензий смешивались в различных соотношениях, после чего исследовались их свойства (рис. 1).

Для характеристики закладочных смесей основными параметрами являются плотность, реологические свойства и пластическая прочность. В качестве основной технологической характеристики принята пластическая прочность.

В исследованиях определяли зависимость конечной прочности закладочной смеси от состава, в частности, от количества и доли отходов, а также количества цемента и глины. На первом этапе были проведены исследования свойств раство-

ров с постоянным количеством содержания отвального шлака и глины. Изменяемым было содержание цемента в составе. В соответствии с планом экспериментов были подготовлены два вида образцов для исследований – с цементом в составе и его полным отсутствием.

Первоначально определялась плотность раствора ($1430\text{--}1560\text{ кг/м}^3$), затем диаметр расплыва определялся с помощью вискозиметра Суттарда и его значение достигало $8\text{--}11\text{ см}$.

Водоотделение в растворе через 4 часа составляло не более 20% раствора. После этого на образцах шлакоглинистого раствора выполнялись реологические исследования (рис. 2).

В результате корреляционно-регрессионного анализа реологических характеристик шлакоглинистых суспензий была установлена линейная зависимость изменения во времени динамического напряжения сдвига τ

$$\gamma = a_0 \cdot \tau + a_1. \quad (3)$$

Коэффициенты линейной регрессии для зависимостей на рисунке 2 сведены в таблице 1.

Результаты экспериментальных исследований шлакоглинистых растворов приведены в таблице 2.

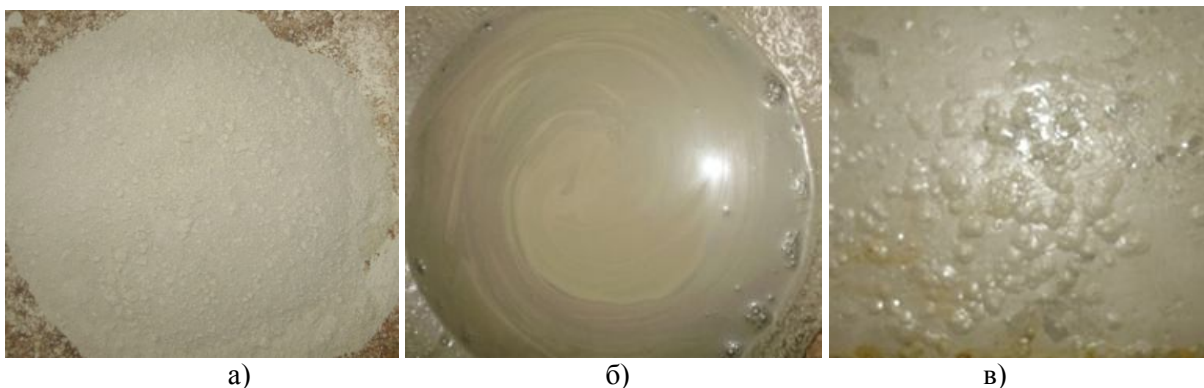


Рисунок 1 – Полученная смесь в сухом состоянии (а), вид свежеприготовленной шлакоглинистой суспензии (б), полученная суспензия на 7 суток твердения (в)

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

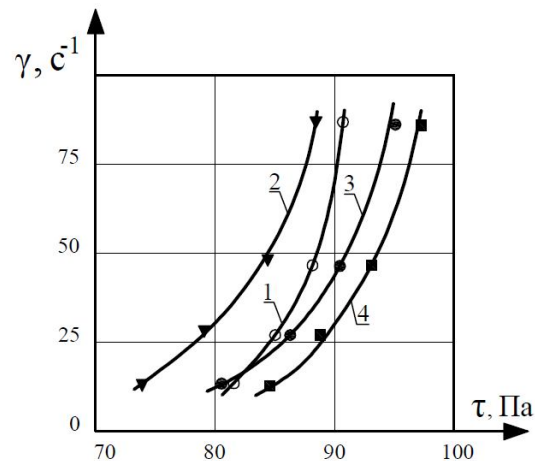


Рисунок 2 – Реологические характеристики шлакоглинистых суспензий:
 1 – глины 10 кг/м³; цемента 40 кг/м³; 2 – глины 10 кг/м³; цемента – 0; шлака 800 кг/м³;
 3 – глины 10 кг/м³; цемента – 0; шлака 840 кг/м³; 4 – глины 20 кг/м³; цемента – 0

Таблица 1 – Коэффициенты регрессии и величины показателя достоверности аппроксимации

№ кривой	Коэффициенты регрессии		R ²
	a ₀	a ₁	
1	6,78	-546,5	0,75
2	6,42	-490,96	0,77
3	7,06	-587,18	0,79
4	5,6	-475,86	0,81
5	6,78	-546,5	0,75

Таблица 2 – Составы и свойства рецептур закладочных смесей

№ п.п.	Параметры суспензий	Значения вариантов опытов			
		1 образец	2 образец	3 образец	4 образец
1	2	3	4	5	6
1	Количество отвального шлака, кг/м ³	800	800	840	820
2	Количество глины, кг/м ³	10	10	10	20
3	Количество воды, кг/м ³	625	625	625	625
4	Плотность базовой суспензии, кг/м ³	1435	1430	1435	1445
5	Количество цемента, кг/м ³	40	-	-	-
6	Плотность раствора, кг/м ³	1490	1452	1457	1460
7	Распływ, см	11	8	9	11
8	Динамическое напряжение сдвига, Па	82	75	80	84
9	Пластическая прочность, кПа на 7 сутки на 10 суток на 15 суток	26,7	119,8	237,3	237,3
		41,05	237,3	310,67	419,21
		148	310,7	588,89	588,89
10	Усадка, %	1,0	2,0	2,0	1,0
11	Угол естественного откоса, град.	11	15	15	12

Таким образом, в результате проведенных исследований рекомендуется бесцементная рецептура шлакоглинистой тампонажно-закладочной смеси:

шлак отвальный молотый – 840 кг/м³; глина бентонитовая – 10 кг/м³; вода – 625 кг/м³.

Параметры смеси приведены в таблице 2 и удовлетворяют требованиям по прокачиваемости, режиму движения, срокам и значениям конечной пластической проч-

ности, что позволяет разработанные шлакоглинистые суспензии применять при тампонажно-закладочных работах в шахтном и подземном строительстве.

По реологическим характеристикам шлакоглинистых суспензий доказано, что они обладают вязкопластичными свойствами ($\tau_0 = 75-85$ Па) и подчиняются деформационному поведению тела Шведова-Бингама.

Библиографический список

1. Кипко Э. Я. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт: учеб. пособ. / [Э. Я. Кипко, П. Н. Должиков, Н. А. Дудля, А. Э. Кипко и др.]. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Днепропетровск: Национальный горный ун-т., 2004. – 367 с.

2. Должиков П. Н. Исследование реологических и структурно-механических свойств тампонажных растворов на базе промышленных отходов для заполнения горных выработок / П. Н. Должиков, В. А. Курнаков // Науковий вісник НГА України. – 2001. – №1. – С. 10–13.

3. Кипко Э. Я. Проектирование глиноцементных тампонажных растворов в горном деле: монография / Э. Я. Кипко, Н. А. Дудля, Н. Н. Тельных, А. В. Попов, Е. Г. Цаплин. – Днепропетровск: Издательский дом «Андрей», 2008. – 176 с.

4. Кипко Э. Я. Комплексная технология ликвидации наклонных горных выработок: монография / Э. Я. Кипко, П. Н. Должиков, В. Д. Рябичев. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 220 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Антощенко Н. И., д.т.н., проф. ДГТУ Кипко А. Э.

Статья поступила в редакцию 18.01.16.

д.т.н. Должиков П. М., к.т.н. Фурдей П. Г. (ТОВ "Славсант", м. Павлоград, Україна) ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕЗЦЕМЕНТНИХ ТАМПОНАЖНО-ЗАКЛАДНИХ СУМІШЕЙ НА БАЗІ ВІДВАЛЬНИХ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ

У дослідженні наведено обґрунтування безцементної в'язкопластичної рецептури закладних сумішей із використанням доменних відвальних шлаків. Доведено, що шлакоглинисті суспензії мають в'язкопластичні властивості та підпорядковані деформаційній поведінці тіла Шведова-Бінгама.

Ключові слова: відвальний доменний шлак, утилізація, вироблений простір, тампонажно-закладні суміші, шлакоглинисті суспензії, реологічні властивості, пластична міцність.

Full Doctor (Engineering) Dolzhykov P. M., PhD (Engineering) Furdiei P. H. (LLC "Slavsant", Pavlograd, Ukraine)

RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF UNCEMENTED BLACKFILL MIXTURE BASED ON DUMP BLAST FURNACE SLAG

The research presents the substantiation of cementless viscoplastic formulations filling mixes using blast slag dump. It is proved that the suspension possesses with viscoelastic properties and is subject to deformation behavior Shvedov-Bingham corps.

Key words: dump blast furnace slag, recycling, goaf, blackfill mixture, suspension possesses, rheological properties, plastic durability.