

УДК 662.341.012: 662.85

В.И. ГОЛИК, д-р техн. наук, проф.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт

(государственный технологический университет)

В. И. КОМАЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный исследовательский университет,

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф. Криворожский национальный университет

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РУД

В работе показано, что радикальным способом охраны окружающей среды является ликвидация хранилищ отходов горного и обогатительного производств с полной утилизацией продуктов переработки. Дается характеристика инновационного направления использования хвостов обогащения для приготовления твердеющих смесей для заполнения техногенных пустот при подземной разработке полезных ископаемых, актуальность которого повышается при переходе от открытого способа разработки к подземному способу. Показано, что использование хвостов без извлечения из них металлов является паллиативом. Активация хвостов в установках типа дезинтегратор не только способствует извлечению металлов, но и улучшает свойства хвостов, создавая условия для применения их в качестве строительных и кладочных материалов. Определено, что кладочные смеси на основе хвостов обогащения обеспечивают необходимую прочность искусственных массивов. Приведены результаты исследований по утилизации хвостов твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих компонентов после извлечения металлов. Доказано, что активация хвостов обогащения путем выщелачивания в дезинтеграторе существенно улучшает качество вторичных хвостов переработки и увеличивает прочность твердеющих смесей из них. Описываемая технология обеспечивает безотходную утилизацию хвостов обогащения, обладая преимуществами экономического и экологического характера по сравнению с традиционными технологиями.

Ключевые слова: хвосты обогащения, утилизация, переработка, твердеющие смеси, подземная разработка, металлы, активация, дезинтегратор, извлечение металлов, прочность, инертные заполнители, вяжущие.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Отходы горного производства представляют собой техногенное сырье, которое складывается из-за отсутствия технологии переработки. Основной причиной накопления хвостов обогащения является наличие в них металлов в количествах, превышающих санитарные нормы.

Доля утилизации отходов добычи и переработки в горном деле и строительной индустрии не превышает 10 %, причем это происходит без извлечения ценных и опасных металлических компонентов. Полное извлечение полезных компонентов позволяет дополнительно получить около 25 % продукции [1].

Биологическая рекультивация не решает экологические проблемы, поэтому радикальным способом охраны окружающей среды считается ликвидация хранилищ отходов с полной утилизацией продуктов переработки.

Экономическая эффективность технологий утилизации хвостов обогащения определяется с учетом способности приносить прибыль в собственном или смежном производствах с минимальным расстоянием транспортирования продуктов утилизации.

Таким направлением является использование хвостов обогащения для приготовления твердеющих смесей для заполнения техногенных пустот при подземной разработке полезных ископаемых. Актуальность направления повышается в настоящее время, когда большинство горных предприятий оказались перед необходимостью перехода от открытого способа разработки к подземному способу, и не только из-за увеличения глубины разработки [2].

Открытый способ разработки месторождений вступил в противоречия с жизненными интересами горнодобывающих регионов, обладая неустраняемыми экономическими и экологическими недостатками. Предстоящий переход многих предприятий, например, КМА на подземный способ требует обеспечения твердеющими смесями для заполнения технологических пустот, добыча которых в необходимых объемах еще более осложнит экологическую ситуацию в регионе.

Сырьем для приготовления твердеющих смесей могут быть хвосты обогащения руд.

В хранилищах России находится более 100 млрд т твердых отходов. Ежегодно образуется около 15 млн т отходов, из которых утилизируется не более 10%.

Накопленный опыт применения отходов горного производства для изготовления бетонов положительным признать нельзя. Препятствием для широкого применения хвостов обогащения в качестве строительного сырья, в первую очередь, является наличие не извлеченных при переработке металлов. Утилизация хвостов без извлечения этих металлов опасна [3].

В состав металлосодержащих минералов входят ценные и дефицитные металлы, стоимость которых может быть сопоставима со стоимостью извлекаемых металлов. Например, в состав минералов Лебединского месторождения, кроме железа, входят кобальт, никель, медь, мышьяк, палладий, серебро, сурьма, теллур, платина, свинец, бериллий и другие металлы.

Наличие в товарной продукции не извлеченных металлов опасно химическим и радиологическим загрязнением, поскольку содержащиеся в отходах металлы под действием процессов естественного выщелачивания мигрируют в экосистемы окружающей среды.

Огромные запасы техногенных месторождений, некондиционные для технологий извлечения металлов, осуществляют разрушительную для окружающей среды деятельность, масштабы которой увеличиваются.

Изложение материала и результаты. Целью исследований является создание технологий рационального использования техногенных отходов горно-обогатительного производства для получения вяжущих и инертных компонентов твердеющих смесей.

В последнее время обосновано, что активация хвостов не только способствует извлечению металлов до уровня ПДК, но и улучшает свойства хвостов, создавая условия для применения их в качестве строительных и кладочных материалов.

Активации хвостов осуществляется в установках типа дезинтегратор [4] (рис. 1).

Дезинтегратор представляет собой два вращающихся в противоположных направлениях ротора, насаженные на отдельные валы. Роторы расположены на одной геометрической оси, каждый с отдельным приводом. На дисках роторов по концентрическим окружностям расположены ряды стержней - пальцев-бил таким образом, что каждый ряд пальцев одного ротора свободно проходит между двумя рядами пальцев другого [5].

Измельчаемый материал подается в центральную часть ротора и, перемещаясь к периферии со скоростью более 250 м/с, подвергается ударам пальцев, вращающихся во встречных направлениях.



Рис. 1. Дезинтегратор

Каждая частица соударяется с пальцами-билами и друг с другом и испытывает высокоэнергетические механические удары, приводящие к ее разрушению (рис. 2).

При обработке в дезинтеграторе в веществе аккумулируется дополнительная энергия, величина которой может достигать 30% от всей затраченной на обработку энергии. Возникающие в дезинтеграторе скорости удара на порядок больше, чем в мельницах, а ускорение достигают миллионов ускорений свободного падения. Активация хвостов обогащения в дезинтеграторе позволяет мелким фракциям концентрироваться с цементом.

В современных технологических процессах феномен изменения состояния вещества с получением нового качества путем воздействия на него механической энергией в дезинтеграторе используется достаточно широко [6].

В программах утилизации отходов обогащения руд целью является оптимизация составов твердеющих смесей для обеспечения нормативной прочности кладочных массивов [7].

Особый интерес заслуживает использование хвостов обогащения полезных ископаемых в составе твердеющей смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих компонентов.

Мелкие фракции обогащения размером до 0,076 мм, включающие карбонатные компоненты, используют в качестве вяжущих. Измельчение хвостов обогащения до тонкодисперсной фракции позволяет изготавливать кладочные смеси достаточной для заполнения подавляющего объема техногенных пустот прочности.

После извлечения металлов до уровня санитарных требований хвосты обогащения пригодны для изготовления закладочных смесей и бетонной товарной продукции, обеспечивая необходимую марку при нормированном расходе цементного вяжущего.

Активация в дезинтеграторе без выщелачивания существенно увеличивает прочность смеси, поэтому активированные в дезинтеграторе смеси даже без добавления цемента могут быть использованы для заполнения подавляющего объема очистных выработок.

Механохимическая активация в дезинтеграторе с добавкой цемента по сравнению с сухой активацией уменьшает прочность смеси за счет последующего увеличения влажности смеси, но это компенсируется увеличением циклов переработки.

Активация вещества уменьшает крупность исходных хвостов, в том числе за счет истирающего эффекта. Максимальный эффект обеспечивают активаторы с максимальной частотой соударений мелющих тел и небольшой интенсивностью ударов.

Расширение области утилизации хвостов обогащения и улучшение состояния окружающей среды обеспечивается реализацией нескольких направлений, которые используют хвосты обогащения, преимущественно, в качестве заполнителя без извлечения из них полезных и ценных металлов, тем самым снижая полноту использования добытых ресурсов.

Исследование параметров единого процесса переработки хвостов - механическую активацию в дезинтеграторе с химическим выщелачиванием осуществлено в установке DESI-11, изготовленной Центром прикладной механохимии "Гефест" по схеме (рис. 2).

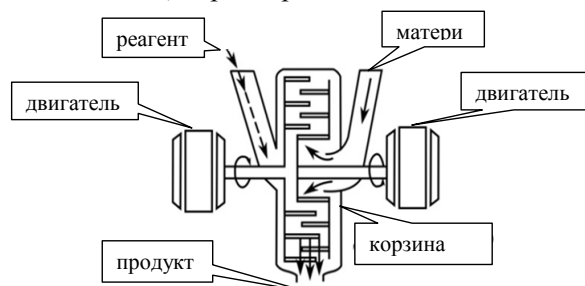


Рис. 2. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе

Исследованы смеси, характеризующиеся постоянным составом:

крупность хвостов обогащения - 1 мм;

соотношение компонентов: инертные, вяжущее, вода - 1445:100:380;

продолжительность твердения 7,14 и 28 суток;

частота вращения роторов дезинтегратора

200 Гц;

состав реагента: 10 г/л серной кислоты и 160 г/л хлорида натрия

Варианты активации хвостов в составе смесей включают в себя:

без активации;

механическая активация в сухом состоянии;

выщелачивание в агитаторе без активации;

механическая активация с агитационным выщелачиванием;

выщелачивание в дезинтеграторе;

многократное выщелачивание в дезинтеграторе.

Химический состав хвостов, %: SiO₂ - 64, Fe - 8, Al₂O₃ - 5,2, Mn - 3,2, K₂O - 0,7, P - 0,1, Ca - 0,8, Mg O - 0,2, Cu - 5·10⁻³, Ni - 4·10⁻³, Zn - 5·10⁻⁴, As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y - на уровне (30-50)·10⁻⁵.

Результаты испытания твердеющих смесей на прочность сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования смесей с цементом и хвостами без активации

Расход портландцемента, кг/м ³	30	60	80	100	120	180
Прочность, МПа	0,79	0,92	0,101	1,20	1,41	1,80
Коэффициент вариации опытов	27	26	28	12	15	18

Примечание: расход воды 380 л/м³.

Для увеличения прочности смеси хвосты классифицированы по крупности (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика классифицированных добавок к хвостам

Фракция	Остаток на ситах в %, мм								Потери при отмучивании, кг/м ³	Удельная поверхность, м ² /кг	Плотность, кг/м ³
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	-0,14			
Крупная	29,0	20,5	15,0	7,7	12,5	4,7	6,4	4,2	3,6	5,0	2700
Мелкая	13,6	16,7	31,7	4,3	17,4	10,0	4,3	3,5	5,0	5,1	2680

Прочность смесей, в которых хвосты обогащения комбинируется по признаку оптимальной крупности (50% крупной и 50% мелкой) увеличивается, что оценивается коэффициентом 1,15-1,25 (табл. 3).

Таблица 3

Прочность смесей с комбинированным по крупности заполнителем, МПа

Расход поргладцемента, кг/м ³	30	60	80	100	120	180
Прочность, МПа	0,85	1,02	1,23	1,40	1,57	1,85
Вариация	21	25	17	19	14	11

Примечание: расход воды 380 л/м³.

Прочность смеси изменяется в зависимости от способа ее подготовки при выщелачивании металлов в дезинтеграторе (табл. 4,5).

Таблица 4

Влияние подготовки на прочность смесей с вяжущим цементом

Вид активации	Состав смеси			Прочность, МПа, с		
	хвосты	цемент	вода	7	14	28
Без активации	1445	100	380	1,04	1,11	1,20
Механическая активация	1445	100	380	1,16	1,25	1,32
Выщелачивание без активации	1445	100	380	0,52	0,61	0,72
Механическая активация с агитационным выщелачиванием	1445	100	380	0,68	0,73	0,88
Выщелачивание в дезинтеграторе	1445	100	380	0,73	0,77	0,94
Многokратное выщелачивание в дезинтеграторе	1445	100	380	0,92	1,10	1,22

Таблица 5

Влияние активации на прочность смесей без вяжущего цемента

Вид активации	Состав смеси			Прочность, МПа, с		
	хвосты	цемент	вода	7	14	28
Без активации	1445	0	380	0,64	0,81	1,01
Механическая активация	1445	0	380	0,86	0,95	1,12
Выщелачивание без активации	1445	0	380	0,42	0,57	0,62
Механическая активация с агитационным выщелачиванием	1445	0	380	0,60	0,69	0,78
Выщелачивание в дезинтеграторе	1445	0	380	0,63	0,71	0,84
Многokратное выщелачивание в дезинтеграторе	1445	0	380	0,82	1,00	1,12

Полученные результаты сравниваются с прочностью смеси с использованием в качестве вяжущего активированных в дезинтеграторе хвостов обогащения (табл. 6)

Таблица 6

Вид активации	Прочность, 28 с, МПа		
	цемент 100 кг/м ³		активация б/цемента
	без активации	с активацией	
Без активации	1,30	-	1,01
Механическая активация	-	1,52	1,22
Выщелачивание без активации	-	0,92	0,62
Механическая активация с агитационным выщелачиванием	-	1,08	0,78
Выщелачивание в дезинтеграторе	-	1,20	0,94
Многokратное выщелачивание в дезинтеграторе	-	1,54	1,12

Хвосты механохимической активации отходов обогащения представляют собой дисперсную массу, сложенную частицами размерами около 0,1 мм, отличающимися более равномерной структурой, что существенно повышает качество при изготовлении бетонных изделий. Эффект этого явления иллюстрируется увеличением прочности бетона, изготовленного при прочих равных условиях на основе хвостов, приготовленных разными способами: размолотых в мельнице и активированных в дезинтеграторе [8].

Хвосты обогащения, активированные в дезинтеграторе, после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований даже без добавления цемента пригодны для изготовления товарной продукции, в том числе массивов из твердеющих смесей, обеспечивающих при определенных геомеханических условиях необходимую прочность. Закладочные смеси на основе

хвостов обогащения обеспечивают прочность искусственных массивов при сжатии до МПа, что отвечает самым жестким требованиям к искусственным массивам.

В мировой практике увеличение объемов утилизации отходов обеспечивается использованием в составе твердеющей смеси в качестве инертных заполнителей и без извлечения опасных компонентов. Такой подход противоречит требованию обеспечения экономических и экологических требований к технологии [9].

Технология изготовления товарной продукции из вторичных хвостов обогащения руд должна обеспечивать:

- получение продукции из отходов обогащения руд плотностью не менее $2,4 \text{ т/м}^3$;
- использование лежалых хвостов обогащения руд;
- прочность твердеющих смесей на одноосное сжатие 0,5-1,5 МПа, достаточную для закладки большинства выработанного пространства;
- снижение расхода цемента на приготовление и доставку смесей по сравнению с базовым значением.

Технологически и экономически целесообразнее использование текущих хвостов обогащения металлических руд с увязкой процессов обогащения и приготовления смесей в единую систему.

После извлечения металлов и солей хвосты обогащения могут быть использованы в составе смеси не только в качестве инертных заполнителей, но и вяжущих (рис. 3).



Рис. 3. Схема приготовления твердеющей смеси на основе хвостов обогащения

Выводы и направление для дальнейших исследований. Результаты многофакторного эксперимента доказано, что активация хвостов обогащения путем выщелачивания в дезинтеграторе существенно улучшает качество вторичных хвостов переработки и увеличивает прочность твердеющих смесей из них.

Технология обеспечивает безотходную утилизацию хвостов обогащения, обладая преимуществами экономического и экологического характера по сравнению с традиционными технологиями [10].

Список литературы

1. Morkun V., Tron V. Ore preparation energy-efficient automated control multi-criteria formation with considering of ecological and economic factors, Metallurgical and Mining Industry, No5, 2014, pp. 8-11.
2. Комащенко В.И., Комащенко С.В., Ерохин И.В., Бурдзиева О.Г. Разработка эффективных методов комплексного и полного извлечения металлов из техногенного сырья, с целью рекреация геологии и горной среды. Труды Воронежского Государственного университета, ВОРОНЕЖ, 20-22 ноября 2013. - С. 330-333.
3. Голик В.И., Полухин О.Н. Природоохранные технологии в горном деле. ИД Белгород НИУ БелГУ. 2013.
4. Golik V.I., Komachshenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources I Disintegrators. Springer International Publishing Switzerland, 2013. P.1001-1010 Scopus.
5. Хинт И.А. УДА- технология: проблемы и перспективы. Таллинн, 1981.
6. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико- технических и физико-химических геотехнологий. Горный журнал. 2013. №5. С.93-96.
7. Фоменко А. А. Использование техногенных скоплений и забалансовых руд цветных металлов в контексте экономики природопользования Горный журнал, 2013. - №2. - С.89-94.
8. Polukhin O.N. Komashchenko V.I. Golik V.I., Drebenstedt K. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production. Technische University Bergakademie Freiberg, Germany Publisher: Medienzentrums der TU Bergakademie Freiberg Printed in Germany ISSN: 2014, 2190-555X. С. 402-413.4.
9. Гендлер С. Г. Обеспечение комплексной безопасности при освоении минерально-сырьевых и пространственных ресурсов недр. Горный журнал. 2014. №5. С.98-102.
10. Golik V.I., Komachshenko V.I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_101, Springer International Publishing Switzerland 2013.

Рукопись поступила в редакцию 22.04.15