

12. Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na Talnakhskom i Oktyabrskom mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Regulations for safe mining at Talnakh and Oktyabrskoe deposits liable and prone to rock-bumps). Norilsk, Saint Petersburg, 2015. (in Russian)
13. Galaov R. B., Nagovitsin Yu. N., Pliyev B. Z., Andreev A. A., Vilchinskiy V. B. Sovershenstvovanie sposobov krepeleniya vyrabotok na rudnikakh Zapolyarnogo Filiala otkrytogo aktsionernogo obshchestva «ГМК «Norilskiy nikel» (Improvement of excavation support techniques in mines of the Norilsk Nickel mining and metallurgical company). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2014. No. 4. pp. 25–28.
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: its basis and fundamentals. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
15. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Kormnov A. A. Characteristics of instrumental support of structural heterogeneity control around mining using noise probing signals. *Sbornik nauchnykh*

- trudov Natsionalnogo Issledovatel'skogo Tekhnologicheskogo Universiteta «MISIS» (Collection of scientific proceedings of National University of Science and Technology «MISIS»)*. Moscow, 2015. pp. 60–65.
16. Anokhin A. G., Semenko K. A., Darbinyan T. P., Tsirel S. V., Mulev S. N. Metodologiya ucheta stepeni vliyaniya narushennosti rudopородного massiva na seismicheskiy risk (Methodology of accounting for effect of ore and host rock damage ratio on seismic risk). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2014. No. 4. pp. 19–24.
17. Underground mining technology: centuries of history from the foundation for today's sophisticated systems. *Engineering and Mining Journal*. 2013. Supplement. pp. 8–16.
18. Fisor S. Roof bolting technology. *Coal Age*. 2012. Vol. 117, No. 5. pp. 26–30.
19. Makarov A. B. *Prakticheskaya geomekhanika. Posobie dlya gornyykh inzhenerov (Practical geomechanics. Tutorial for mining engineers)*. Moscow: Gornaya kniga, 2006. 391 p.

УДК 622.273.217.4

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА РУДНИКА «КОМСОМОЛЬСКИЙ»*



А. В. БЫЛКОВ,
заместитель директора
по горному производству,
andreevaiv@tf.nk.nornik.ru



О. А. ГЕЛЦ,
специалист 1-й категории
Центра геодинамической
безопасности

ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия



В. В. АРШАВСКИЙ,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук,
ИПКОН РАН, Москва, Россия



В. И. ХУЦИШВИЛИ,
старший научный сотрудник,
АО «ВНИМИ»,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

В 2011 г. на руднике «Комсомольский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» была построена и пущена в эксплуатацию промышленная установка (ПУ) по приготовлению закладочных смесей (ЗС) состава шлак–хвосты–цемент (ШХЦ) с использованием породных хвостов Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ). Производительность ПУ по производству ЗС составляет 750 тыс. м³/год. Пульпу хвостов с содержанием твердого 0,3 подают шламовыми насосами с ТОФ по трубопроводу в накопительный приемный бак емкостью 200 м³, откуда по мере необходимости отбирают и подают насосами на батарею гидроциклонов.

Пески гидроциклонов направляют либо в смеситель, либо в мельницу (предусмотрены оба варианта). Одновременно подают

Рассмотрены причины перепадов качества закладочной смеси относительно кинетики набора прочности. Определены химический и минеральный состав всех компонентов закладочной смеси, установлены факторы, влияющие на прочностные свойства бетона на протяжении всего его жизненного цикла. Результаты прессовых испытаний твердеющих закладочных составов, приготовленных с использованием породных хвостов Талнахской обогатительной фабрики с различным содержанием серы, свидетельствуют о зависимости прочности твердеющего бетона от содержания серы в хвостах.

Ключевые слова: закладочная смесь, состав шлак–хвосты–цемент, хвосты обогащения, кинетика набора прочности, физико-химические исследования, реологические свойства, виды коррозий бетона, транспортабельность закладочной смеси.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.07

гранулированный, предварительно дробленный до крупности частиц менее 3 мм шлак металлургического производства и цемент. Дробление шлака производят при подаче его вместе с другими компонентами в смеситель. Перед подачей в мельницу шлак не дробят. В смесителе все компоненты перемешивают, в мельнице — измельчают и еще раз перемешивают, после чего готовую ЗС подают в закладочную скважину и далее в самотечном или пневмосамотечном режиме по подземным бетоноводам — в выработанное пространство. Сливы гидроциклонов направляют в сгуститель, откуда сгущенную часть пульпы направляют в смеситель или в мельницу, а осветленную — в бак возврата хвостов и далее — на ТОФ.

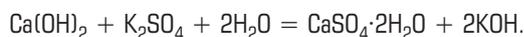
На первоначальном этапе эксплуатации ПУ были обнаружены перепады качества ЗС относительно кинетики набора прочности, что не гарантирует постоянной безопасности при ведении горных работ по контакту с бетонными обнажениями. При обсуждении данной проблемы было высказано предположение, что ее наиболее вероятной причиной является нестабильный состав породных хвостов. На обогатительных фабриках, как правило, оперативно контролируют содержание в хвостах ценных компонен-

* В работе также принимали участие П. С. Гузанов, А. Э. Лытнева, К. Б. Толпаров, К. В. Смолков.

тов, которые составляют весьма незначительную часть в общем объеме хвостов, и поэтому вряд ли могут влиять на качество ЗС. Содержание же остальных компонентов, составляющих основную часть хвостов (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, S, K₂O, Na₂O и т. д.), не регулируют, поскольку они являются отходом производства и не представляют интереса. Их доля зависит от первоначального содержания в перерабатываемой руде, которое имеет случайный характер. Однако в составе этих хвостов, помимо перечисленных компонентов, в большом количестве содержатся никель и медь-содержащие сульфиды, поэтому одной из вероятных причин снижения прочности закладочного массива при нестабильной кинетике его твердения может быть сульфатная коррозия бетона. При этом данное предположение рассматривалось лишь как рабочая гипотеза, согласно которой химизм коррозионных процессов в твердеющей ЗС происходит по схеме, изложенной в работах [1, 2].

Методика исследований

В цементном камне под действием ионов SO₄²⁻, связанных с катионами Ca²⁺ и K⁺, происходит сульфидно-алюминатная и гипсовая коррозия, которая возникает в средах с содержанием ионов SO₄²⁻ более 250 г/л. При этом свободный гидроксид кальция реагирует с SO₄²⁻ с образованием гипса:



Гипс, в свою очередь, вступает во взаимодействие с высокоосновными алюминатами кальция, находящимися в цементе, с образованием малорастворимой трехсульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция (этtringита) из твердого Ca₂AlH₆. Этот процесс сопровождается увеличением твердой фазы примерно в 4,76 раза (по сравнению с Ca₂AlH₆), что вызывает возникновение сильных напряжений в цементном камне, приводящих к нарушению его структуры, деформациям и снижению прочности. По аналогичной схеме в цементном камне проходит и кислотная коррозия.

Учитывая гипотетический характер изложенного механизма коррозии ЗС при работе с хвостами ТОФ и острую необходимость стабилизировать кинетику твердения ЗС, было принято решение о необходимости углубленного изучения процессов, которые происходят в твердеющей смеси состава ШХЦ, приготовленной с использованием породных хвостов ТОФ.

В связи с этим были инициированы исследования по выявлению и оценке истинных причин, влияющих на качество ЗС. Данная работа предусматривала проведение физико-химических исследований (ФХИ) смеси и ее ингредиентов в процессе твердения в контрольные сроки прессовых испытаний. Лабораторные опыты выполняли ИПКОН РАН и Центр геодинимической безопасности ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» [2, 3].

Были поставлены и решены следующие задачи:

- определение химического и минерального состава всех компонентов ЗС;
- установление факторов, влияющих на прочностные свойства бетона на протяжении всего его жизненного цикла;

- определение взаимного влияния компонентов смеси на структурно-химическую устойчивость бетона и его прочностные свойства в процессе эксплуатации.

Необходимые для прессовых испытаний опытные смеси и образцы готовились из закладочных материалов (шлак, хвосты и цемент). Были изготовлены и испытаны на прочность образцы кубической формы с ребром 10 см, приготовленные из закладочных смесей состава ШХЦ по следующим рецептурам, кг/м³: № 1: Ш = 600, Х = 800, Ц = 170; № 2: Ш = 400, Х = 1000, Ц = 170; № 3: Ш = 200, Х = 1200, Ц = 170.

По каждой рецептуре готовили и испытывали две серии опытных ЗС с различным содержанием серы в хвостах: 8 % (проба хвостов № 1) и 6,1 % (проба № 2). При этом проводили совместный помол шлака, хвостов и цемента в лабораторной мельнице МЦП-40. При дозировании компонентов, загружаемых в мельницу, учитывали количество воды, находящейся в хвостах и шлаке.

Процесс измельчения осуществляли до получения сметанообразной консистенции, отвечающей необходимым требованиям по реологическим свойствам.

Реологические свойства свежеприготовленных растворов оценивали по их консистенции, а также диаметру и форме «блина», образуемого при выпуске порции испытываемой смеси из кольца-конуса МХТИ (Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева) по методике [4].

Контроль качества смеси производили каждые 3–4 мин измельчения. Мельницу останавливали и отбирали из барабана пробу. По достижении удовлетворительного качества смесь разливали в заранее приготовленные формы для получения образцов, с помощью которых определяли пределы прочности на сжатие в контрольные сроки испытаний (28, 90 и 180 сут). Готовили по три образца каждой рецептуры с целью последующего осреднения полученных результатов. Испытания на прочность проводили по стандартным методикам (ГОСТ 5382-91, 310.4-81, 8735-88, 8267-93, 5802-86) на автоматизированном гидравлическом прессе ИП 6010-100-1 [5, 6]. Результаты прессовых испытаний представлены в **таблице**.

Пределы прочности на сжатие опытных смесей в контрольные сроки

Удельные расходы материалов, кг/м ³	Содержание S в хвостах, %	Количество S в 1 м ³ ЗС, кг	S/Ц	Пределы прочности на сжатие (МПа) в контрольные сроки испытаний, сут		
				28	90	180
Ш = 600 Х = 800 Ц = 170	8,0	64,0	0,38	1,0	2,5	3,3
	6,1	48,8	0,29	1,4	3,0	3,7
Ш = 400 Х = 1000 Ц = 170	8,0	80,0	0,47	0,6	1,6	2,1
	6,1	61,0	0,36	0,9	1,6	2,2
Ш = 200 Х = 1200 Ц = 170	8,0	96,0	0,56	0,4	0,9	1,3
	6,1	73,2	0,43	0,7	0,9	1,4

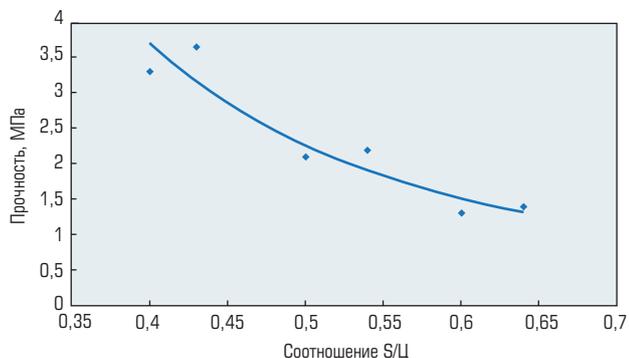


Рис. 1. Зависимость прочности закладочного бетона от отношения S/C

Как видно, на протяжении всего обследованного срока от 0 до 180 сут кинетика твердения всех опытных составов была положительной. Вместе с тем при больших удельных расходах хвостов (более 1000 кг/м³) после 90 сут происходило снижение прочности образцов. Поскольку предположение, что причиной разупрочнения бетона является его сульфатная коррозия, было рабочей гипотезой на тот момент, то анализ результатов прессовых испытаний проводили с учетом серной составляющей ЗС. При этом в качестве влияющего фактора, который определяет развитие коррозионных процессов с образованием этtringитов, разрушающих внутреннюю структуру бетона, рассматривалось не содержание серы в хвостах, а соотношение между количеством серы и цемента в 1 м³ ЗС (S/C). Поэтому в таблице наряду с показателями прочности указаны значения S/C для всех испытанных рецептур ЗС. На **рис. 1** представлен график зависимости пределов прочности опытных образцов от соотношения S/C. К анализу принимались 180-суточные пределы прочности, по которым, согласно действующему технологическому регламенту, на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» определяют марочность ЗС [7, 8].

Разрушение опытных образцов от прессовой нагрузки происходило не одномоментно, а поэтапно. При этом все образцы разрушались по одинаковому сценарию: сначала — боковые поверхности, а сердцевина до последнего этапа сохраняла свою сплошность, которая нарушалась лишь при полном разрушении образца (**рис. 2**). Это свидетельствует о структурной однородности испытываемого бетона, что позволяет дать положительную оценку его устойчивости и эксплуатационным характеристикам.

Химическими исследованиями устанавливали наличие или отсутствие в твердеющем бетоне коррозионных процессов. При этом исследовали и определяли признаки не только сульфатной, но и других известных видов коррозий:

- углекислотной, обусловленной действием на цементный камень углекислоты и являющейся частным случаем кислотной коррозии; диагностируется по результатам рентгеноструктурного анализа при проявлении на рентгенограмме повышенного содержания CaCO₃;

- гипсовой, которая происходит под действием воды, содержащей большое количество Na₂SO₄ или K₂SO₄;
- магниальной, подразделяемой на собственно магниальную, вызываемую действием катионов магния при отсутствии в воде ионов SO₄²⁻, и сульфатно-магниальную, происходящую в цементном камне при совместном действии на него ионов Mg²⁺ и SO₄²⁻.

Кроме того, учитывалось, что в ЗС может наблюдаться железистый распад, определяющийся превращением сульфидов железа в гидрат закиси железа и сероводород при контакте с воздухом. При этом имеет место увеличение объема смеси на 38 %, что в итоге провоцирует локальные разрушения. Железистый распад может быть обнаружен методами электронной микроскопии по наличию хлопьевидных образований внутри крупных пор.

Минералогический состав шлака, хвостов и цемента определялся методом рентгенографического анализа. Анализ проводился по ГОСТ 51795-2001 на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 SHIMADZU, оснащенный системой автоматической регистрации и обработки спектров. Идентификация минералов осуществлялась с применением автоматизированного поиска в системе JCPDS. Коррекция результатов проводилась сверкой с результатами химического анализа.

Бетон формируется на основе вяжущего, в качестве которого используется добавочный цемент по ГОСТ 31108-2003. В качестве заполнителя применяются хвосты и шлак по ГОСТ 5578-84.

При проведении исследований не обнаружены какие-либо структурно-химические трансформации заполнителя, не наблюдалось также формирование гидратных фаз железа, что было бы характерно для железистого распада. Существенным структурным изменениям подвергается входящий в состав хвостов сульфат кальция, при этом формируется фаза двуводного гипса и убывает концентрация содержащегося в хвостах ангидрита.

Характерной особенностью формирования структуры бетона при содержании хвостов выше 800 кг/м³ является быстрое растворение ангидрида с образованием фазы двуводного гипса. Однако при этом не отмечается развитие фазы этtringита, что объясняется низким содержанием алюмината кальция в цементе норильского производства. Наиболее быстро формирование двуводного гипса в ЗС протекает при содержании хвостов выше 1000 кг/м³, при этом, соответственно, убывает количество ангидрита. Эти процессы находят отражение в формировании общей гидратации цементного камня, незначительно снижая показатель гидратации по алиту. В целом это не является дефектом закладочной смеси [9–11].

Электронно-микроскопический анализ проводился на электронном микроскопе Jeol 6610 LV, позволяющем использовать при наблюдении режим низкого вакуума, который не предусматривает напыления проводящего слоя и, соответственно, не искажает анализируемую структуру дополнительным локальным поверхностным термическим воздействием.

Проведенные исследования позволили установить, что на ранних этапах твердения ЗС наблюдается образование структуры этtringита, исчезающей уже через 20–28 сут. При взаимодействии

гидроксида кальция с аморфной стеклофазой шлака формируются фазы гидросиликатов кальция, создающие условия образования межзеренных связей, упрочняющих закладочную смесь.

Результаты анализа показывают, что наиболее приемлемыми прочностными свойствами обладают закладочные смеси состава: хвосты — 800, шлак — 600 кг/м³. Однако из опыта работы ПУ ясно, что данный состав мало пригоден для транспортирования по действующим подземным бетоноводам (до 3,5 км).

При содержании хвостов более 1000 кг/м³ структура закладки приобретает землистое строение с плохо развитыми межзеренными контактами, что объясняется преобладанием в составе хвостов дисперсных фаз, близких по фракционному составу к цементу. В результате нарушается сплошность цементирующей массы, поэтому состав смеси должен иметь ограничения по концентрации дисперсной составляющей хвостов (рис. 3). В связи с изложенным в качестве оптимального удельного расхода хвостов состава ШХЦ рекомендован уровень 1000 кг/м³.

Присутствие шлака в ЗС оказывает положительное влияние на прочностные свойства закладочного бетона. Исследованиями установлено, что при взаимодействии гидроксида кальция с аморфной стеклофазой шлака формируются фазы гидросиликатов кальция, создающие условия образования межзеренных связей. Уменьшение содержания шлака в ЗС может приводить к снижению ее прочности и повышению воздухо- и водопроницаемости, что существенно ухудшает эксплуатационные свойства бетона. В качестве нижнего предела удельного расхода шлака в ЗС следует принимать 250–400 кг/м³.

Таким образом, в ходе ФХИ не обнаружены признаки какого-либо вида коррозии закладочного бетона состава ШХЦ, а полученные в результате этих исследований ограничения по удельным расходам шлака и хвостов объясняются структурными особенностями закладочного бетона, т. е. имеют физическую природу [12].

Результаты прессовых испытаний твердеющих ЗС состава ШХЦ, приготовленных с использованием породных хвостов ТОФ с различным содержанием серы, свидетельствуют о том, что прочность твердеющего бетона зависит от содержания серы в хвостах. Вместе с тем сульфатная коррозия в бетоне состава ШХЦ отсутствует. Таким образом, налицо противоречие в выводах по влиянию серы на твердение бетона по результатам прессовых испытаний и ФХИ. Однако данное противоречие имеет лишь внешний характер и объясняется следующим образом.

Сера присутствует в хвостах ТОФ в составе никельсодержащих сульфидов преимущественно в тонких фракциях, сопоставимых по размеру частиц с цементом. Высокое содержание серы в хвостах и большая доля тонких фракций, оказывают отрицатель-



Рис. 2. Характерный вид полуразрушенного образца состава ШХЦ



Рис. 3. Закладочная смесь по рецептуре, кг/м³: Ш = 600, Х = 800, Ц = 170 (проявлены межзеренные контакты)

ное влияние на структуру твердеющей ЗС и ее прочностные характеристики. При увеличении количества тонкодисперсных частиц хвостов смесь приобретает землистое строение с плохо развитыми межзеренными контактами, нарушается сплошность цементирующей массы и снижается ее прочность при твердении [13, 14].

Заключение

Таким образом, результаты прессовых испытаний и ФХИ закладочной смеси состава шлак–хвосты–цемент показали, что при приготовлении низкомарочной смеси М30 наилучшие прочностные показатели обеспечивает закладка, приготовленная по рецептуре № 1, кг/м³: Ш = 600, Х = 800, Ц = 170. Вместе с тем эксплуатация ПУ показала, что такая закладка не обладает необходимой транспортабельностью — дальность ее транспортирования по существующим бетоноводам на горизонтальных участках не превышала 100 м. Перемещение такой ЗС по трубам сопровождалось чрезмерным увеличением давления в них и образованием пробок на поворотах, сужениях, расширениях и т. п. Причиной этого является большое количество шлака в ЗС, что обуславливает быструю закупорку бетоноводов. Уменьшение удельного расхода шлака потребует соответствующего увеличения удельного расхода хвостов и, как следствие, приведет к снижению прочностных характеристик твердеющего бетона.

Результаты ранее выполненных исследований, подтвержденные впоследствии испытаниями различных вариантов приготовления ЗС на ПУ (в мельнице или смесителе), показывают, что наилучшими прочностными и реологическими свойствами при прочих равных условиях обладают смеси, приготовленные путем совместного помола шлака, хвостов и цемента в шаровой мельнице.

Для улучшения реологических свойств ЗС состава ШХЦ и повышения ее транспортабельности без существенного уменьшения шлака и хвостов рекомендовано готовить смесь преимущественно путем совместного мельничного помола. При этом для приготовления низкомарочной смеси М30 оптимальной следует считать рецептуру: Ш = 300–350 кг/м³, Х = 1050–1100 кг/м³, Ц = 160–180 кг/м³. Практика эксплуатации ПУ подтвердила правомерность изложенных выводов.

Библиографический список

1. Хомяков В. И. Зарубежный опыт закладки на рудниках. — М.: Недра, 1984 г. — 224 с.
2. Маннанов Р. Ш., Зверев А. П., Ангелов В. А., Лавенков В. С. Исследования составов и способов приготовления закладочных смесей на подземных передвижных закладочных установках // Маркшейдерский вестник. 2012. № 3. С. 12–16.
3. Feng Guang-Ming, Ding Yu, Zhu Hong-Ju, Bai Jian-Biao. Zhogguo kuangye daxue xuebao // Journal of China University of Mining and Technology. 2010. Vol. 39. № 6. P. 813–819.
4. Hassani F. P., Benzaazoua M., Nokken M. Evaluation of the effect of sodium silicate addition to mine Backfill, Gelfill // 22nd World Mining Congress & Expo. — Istanbul, 2011. Vol. 1. P. 317–324.
5. Szponder D. K., Trybalski K. The determination of physico-chemical and mineralogical properties of fly ash used in mining industry // 22nd World Mining Congress & Expo. — Istanbul, 2011. Vol. 2. P. 629–639.
6. Ермолович Е. А., Измestьев К. А. Исследование физико-механических свойств горно-металлургических отходов как компонентов твердеющих закладочных смесей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 10. С. 9–15.
7. Пирогов Г. Г., Пакулов В. В. Исследование на одноосное сжатие твердеющих закладочных смесей на основе хвостов обогащения // Вестник ЧитГУ. № 10. 2011. С. 105–110.
8. Гузанов П. С., Лытнева А. Э., Анушенков А. Н., Волков Е. П. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки место-

- рождений Норильского промышленного района // Горный журнал. 2015. № 6. С. 85–88.
9. Balaz P., Ficeriova J., Boldizarova E., Haber M., Jelen S., Kammel R. Thiosulfate leaching of gold from a mechanochemically pretreated complex sulfide concentrate / Proc. XXI IMPC, Rome, Italy, July 23–27, 2000. — Amsterdam, Elsevier, 2000. P. A6-74–A6-81.
10. Стовманенко А. Ю., Анушенков А. Н. Опытная установка для исследования характеристик литых закладочных смесей при их механической активации // Современная технология освоения минеральных ресурсов. 2012. № 10. С. 181–184.
11. Зайцев Д. А. Методы изучения деформаций закладочного массива при отработке глубокозалегающих богатых железных руд // Современные проблемы освоения недр: материалы II Международной заочной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Белгород. 7–20 мая, 2012. С. 174–177.
12. Вилчинский В. Б., Трофимов А. В., Корейво А. Б., Галаов Р. Б., Марысюк В. П. Обоснование целесообразности применения систем разработки с закладочными смесями на рудниках Талнаха // Цветные металлы. 2014. № 9. С. 23–28.
13. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Арсентьев В. А., Квитка В. В., Маннанов Р. Ш. Новая технология и оборудование для высокопроизводительной закладки выработанного пространства при подземной отработке месторождений // Горный журнал. 2012. № 2. С. 41–43.
14. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Корнеев Ю. В. Передвижные закладочные комплексы в системах разработки рудных месторождений с закладкой выработанного пространства // Горный журнал. 2013. № 2. С. 101–104. [dx](#)

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 7, pp. 32–36
DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.07](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.07.07)

Analysis and assessment of influences on backfill quality in Komsomolsky Mine

Information about author

A. V. Bylkov¹, Deputy Director for Mining, andreevaiv@tf.nk.norik.ru
O. A. Gets¹, First Category Specialist of Geodynamic Safety Department
V. V. Arshavskiy², Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences
V. I. Khutishvili³, Senior Researcher

¹ Polar Division, Norilsk Nickel, Norilsk, Russia

² Institute of Integrated Mineral Development — IPKON, Moscow, Russia

³ VNIMI Institute, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

With the purpose of tailings utilization within the framework of the environmental program accepted at Norilsk Nickel, Komsomolsky Mine has built and commissioned a full-scale plant for manufacturing backfill mixtures using tailings of Talnakh Processing Plant. At the early stage of operation, it appeared that backfill mixture exhibited low kinetics of strength development. A cause was probable sulfate corrosion of concrete, that induced high stresses in hardened cement paste resulting in its destructuring, deformation and strength loss. Considering the hypothesized corrosion of backfill mixture made of Talnakh Processing Plant tailings and the urgently required stabilization of the mixture curing kinetics, it was decided to undertake comprehensive study of the mixture composed of slag, tailings and cement by compression testing with definition of rheological properties and by physicochemical testing.

The studies showed the absence of sulfate corrosion of slugs-tailings-cement concrete. In preparation of low-grade mixture M30, the best strength performance was achieved with a backfill mixture composed of S (slag) = 600 kg/m³, T (tailings) = 800 kg/m³, C (cement) = 170 kg/m³. At the same time, the mixture possessed sufficient flowability — the haulage distance in the available concrete-delivery pipelines on horizontal sites is under 100 m. Aiming to improve rheological properties and flowability of this backfill without considerable reduction in the portions of slag and tailings, various mixture preparation circuits were tested and the best variant was joint ball milling of slag, tailings and cement. The optimum mix formulation was: S = 300–350 kg/m³, T = 1050–1100 kg/m³, C = 160–180 kg/m³. The actual operation of the developed full-scale plant has proved the validity of the above conclusions.

The authors appreciate contribution of Guzanov P. S., Lytneva A. E., Tolparov K. B. and Smolov K. V. to this study.

Keywords: backfill mixture, slag–tailings–cement composition, tailings, strength development kinetics, physicochemical tests, rheological properties, concrete corrosion types, backfill mixture flowability.

References

1. Khomyakov V. I. *Zarubezhnyy opyt zakladki na rudnikakh* (Foreign experience of backfilling on mines). Moscow: Nedra, 1984. 224 p.
2. Mannanov R. Sh., Zverev A. P., Angelov V. A., Lavenkov V. S. Issledovaniya sostavov i sposobov prigotovleniya zakladochnykh smesey na podzemnykh peredvizhnykh zakladochnykh ustanovkakh (Research of compositions and methods of preparation of bookmark mixtures on underground movable bookmark options). *Markshyderskiy vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2012. No. 3. pp. 12–16.
3. Feng Guang-Ming, Ding Yu, Zhu Hong-Ju, Bai Jian-Biao. Zhogguo kuangye daxue xuebao. Journal of China University of Mining and Technology. 2010. Vol. 39, No. 6. pp. 813–819.
4. Hassani F. P., Benzaazoua M., Nokken M. Evaluation of the effect of sodium silicate addition to mine Backfill,

Gelfill. 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul, 2011. Vol. 1. pp. 317–324.

5. Szponder D. K., Trybalski K. The determination of physico-chemical and mineralogical properties of fly ash used in mining industry. 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul, 2011. Vol. 2. pp. 629–639.
6. Ermolovich E. A., Izmestev K. A. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gorno-metallurgicheskikh otkhodov, kak komponentov tverdeyushchikh zakladochnykh smesey (Research of physicochemical properties of mining wastes as components of hardening stowing mixtures). *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012. No. 10. pp. 9–15.
7. Pirogov G. G., Pakulov V. V. Issledovanie na odnoosnoe szhatie tverdeyushchikh zakladochnykh smesey na osnove khvostov obogashcheniya (Investigation of axial compression test of solidifying filling mixtures on the basis of concentration tailings). *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Chita State University*. 2011. No. 10. pp. 105–110.
8. Guzanov P. S., Lytneva A. E., Anushenkov A. N., Volkov E. P. Zakladochnye smesi na osnove otkhodov obogashcheniya rud v sistemakh podzemnoy razrabotki mestorozhdeniy Norilskogo promyshlennogo rayona (Backfill based on ore mill tailings in underground mines in the Norilsk Industrial Area). *Gornyy Zhurnal = Mining Journal*. 2015. No. 6. pp. 85–88.
9. Balaz P., Ficeriova J., Boldizarova E., Haber M., Jelen S., Kammel R. Thiosulfate leaching of gold from a mechanochemically pretreated complex sulfide concentrate. Proceedings of the XXI IMPC, Rome, Italy, July 23–27, 2000. Amsterdam, Elsevier, 2000. pp. A6-74–A6-81.
10. Stovmanenko A. Yu., Anushenkov A. N. Opytnaya ustanovka dlya issledovaniya kharakteristik litykh zakladochnykh smesey pri ikh mekhanicheskoy aktivatsii (Pilot plant for investigation of characteristics of cast filling mixtures during their mechanical activation). *Sovremennye tekhnologii osvoeniya mineralnykh resursov* (Modern technologies of mastering of mineral resources). 2012. No. 10. pp. 181–184.
11. Zaytsev D. A. Metody izucheniya deformatsiy zakladochnogo massiva pri otrabotke glubokozalezayushchikh bogatyykh zheleznykh rud (Methods of investigation of deformation of filling massif during deep rich iron ore stoping). *Sovremennye problemy osvoeniya nedr: materialy II Mezhdunarodnoy zaachnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov* (Modern problems of soil mastering: materials of the II International absentee scientific-practical conference of young scientists, post-graduate students and students). Belgorod, 7–20 May 2012. pp. 174–177.
12. Vilchinskiy V. B., Trofimov A. V., Koreyvo A. B., Galaov R. B., Marysyuk V. P. Obosnovanie tselesoobraznosti primeneniya sistem razrabotki s zakladochnymi smesyami na rudnikakh Talnakh (Substantiation of reasonability of application of stowing mining systems at Talnakh mines). *Tsvetnye Metally = Non-ferrous metals*. 2014. No. 9. pp. 23–28.
13. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Arsentev V. A., Kvitka V. V., Mannanov R. Sh. Novaya tekhnologiya i oborudovanie dlya vysokoproizvoditelnoy zakladki vyrobotannogo prostanstva pri podzemnoy otrabotke mestorozhdeniy (New technology and equipment for high-production backfilling of mined-out area during underground mining of deposits). *Gornyy Zhurnal = Mining Journal*. 2012. No. 2. pp. 41–43.
14. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N., Korneev Yu. V. Peredvizhnye zakladochnye komplekсы v sistemakh razrabotki rudnykh mestorozhdeniy s zakladkoy vyrobotannogo prostanstva (Mobile stowing complexes in the systems of development of ore deposits with mined-out areas stowing). *Gornyy Zhurnal = Mining Journal*. 2013. No. 2. pp. 101–104.