УДК 622.343.5.012.2:622.273.218

© Коллектив авторов, 2009

ИЗЫСКАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ в составе твердеющих закладочных смесей

М. В. Рыльникова, главный научный сотрудник, проф., д-р техн. наук (УРАН ИПКОН РАН)

Д. Н. Радченко, старший научный сотрудник, канд. техн. наук (УРАН ИПКОН РАН)

В. В. Григорьев, технический директор (ОАО «Учалинский ГОК»)

К. Ж. Рахматулина, начальник строительной лаборатории (ОАО «Учалинский ГОК»)

Ценность медноколчеданных руд месторождений Уральской колчеданной формации и их склонность к самовозгоранию предопределяют необходимость применения систем разработки с закладкой выработанного пространства. В связи с этим проблема изыскания технологий формирования искусственных массивов с использованием доступных и экономичных закладочных материалов весьма актуальна для всех горнодобывающих предприятий, осуществляющих подземную добычу руд в этом регионе. Основным недостатком систем разработки с твердеющей закладкой являются высокие и интенсивно растущие затраты на компоненты твердеющей смеси – цемент и заполнители. Решение этого вопроса базируется на применении местных материалов, преимущественно отходов производства, пригодных для приготовления твердеющей закладочной смеси. На большинстве действующих горно-обогатительных и металлургических предприятий объем накопленных отходов достаточно велик, причем они уже измельчены и без высоких дополнительных затрат могут быть использованы для приготовления твердеющей закладочной смеси.

Изыскание возможности и обоснование параметров технологий приготовления закладочных смесей с использованием отходов обогащения потребовали проведения комплекса лабораторных и опытно-промышленных исследований, которые включали изучение процессов обезвоживания текущих хвостов обогащения, их транспортирования на закладочный комплекс, подбор рациональных составов смесей, оценку механических характеристик формируемых искусственных массивов, расчет технико-экономических показателей технологии.

Утилизация отходов переработки руд в выработанном подземном пространстве возможна при выполнении следующих условий: наличия подземных пустот необходимого объема и эффективной технологии размещения в них соответствующих отходов; создания композиций закладочных смесей, обеспечивающих возведение искусственных массивов, пригодных для использования в конкретных горнотехнических условиях разработки месторождений.

К исходным материалам, используемым для приготовления закладочных смесей, предъявлялись следующие требования: необходимость утилизации накопленных и формируемых отходов, низкая стоимость и достаточные запасы компонентов смеси вблизи разрабатываемого месторождения, невысокие затраты на их транспортирование и подготовку, обеспечение требуемых технологических свойств и механических характеристик формируемого закладочного массива. На базе предварительных минералогических и химико-аналитических исследований было рекомендовано использовать в качестве заполнителей закладочных смесей местные отходы производства: текущие хвосты обогащения и отходы Юлдашевского карьера по добыче известняков и доломитовых пород. Исследования проводились в двух направлениях: изыскание составов закладочных смесей на основе комбинированного цементно-шлакового вяжущего, что позволяет существенно снизить расход цемента (в строительной лаборатории ОАО «Учалинский ГОК»), и на основе бесцементного вяжущего (исследования проводились по методике УРАН

ИПКОН РАН в лаборатории закладки ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова»).

В исследованиях составов закладочных смесей на основе комбинированного цементно-шлакового вяжущего расход компонентов варьировался в пределах: цемент 40–150 кг/м^3, измельченный конвертерный шлак сталеплавильного производства – 200–300 кг/м^3, хвосты обогащения влажностью 14–21,6 % – 800–1465 кг/м^3, диабаз крупностью –20+0 мм – 360–425 кг/м^3. Варьировались также расход и состав затворителя смеси, в качестве которого использовалась свежая техническая или оборотная вода в количестве 480–580 кг/м^3. В качестве базового состава была принята закладочная смесь «хвосты + цемент» при расходе 1465 и 80 кг/м^3 соответственно и исходной влажности хвостов 14,5 %, с добавлением свежей технической воды до 1 м^3. Прочность образцов закладки такого состава в возрасте 28 сут составила 0,53 МПа (рис. 1), что значительно ниже нормативного значения.

На первом этапе исследований было установлено, что введение в состав смеси комбинированного цементно-шлакового вяжущего позволяет снизить расход цемента по сравнению с базовым составом до 2 раз. При этом прочность закладочного массива составила 1,07 МПа (см. рис. 1), т. е. увеличилась также в 2 раза. Такая прочность обеспечивает устойчивость вертикальных обнажений высотой до 40 м, что соответствует требованиям проекта на подземную отработку запасов Учалинского рудника. Увеличение расхода цемента до 150 кг/м^3 и добавление шлака в количестве 280 кг/м^3 повышает прочность образцов до 10,93 МПа (см. рис. 1), что позволяет формировать из закладочной смеси данного состава несущие конструкции.

На втором этапе работ была оценена возможность полной замены цемента в составе смеси известковым вяжущим. Известковое вяжущее было предложено получать путем обжига некондиционных карбонатных пород фракции –50+0 мм, складированных в отвалах Юлдашевского карьера. Исследования показали, что в результате обжига карбонатных пород при температуре 900–1050 °С происходит их полная декарбонизация, т. е. переход карбонатов магния и кальция в соответствующие оксиды. Получаемый при этом продукт является, по сути, негашеной известью, которая при затворении водой интенсивно выделяет тепло, значительно превышающее тепловыделение при затворении портландцемента. Полученная в результате обжига карбонатных пород известь была использована при приготовлении закладочных смесей на основе хвостов обогащения Учалинской обогатительной фабрики. Ввиду достаточно высокой скорости гашения затворение извести в составе смеси проводили раствором лигносульфоната натрия, замедляющим скорость гашения в среднем на 30 мин, что позволяет осуществлять приготовление закладочной смеси и ее транспортирование по закладочному трубопроводу на требуемые расстояния. При этом разогрев смеси происходит непосредственно в закладываемой камере.

В ходе эксперимента по подбору состава закладочной смеси в широком диапазоне варьировались расход компонентов, влажность хвостов обогащения, крупность обожженного известняка, концентрация раствора лигносульфоната натрия. Установлен следующий рациональный состав смеси: хвосты обогащения с влажностью 25 % – 2050–2010 кг/м^3; известь крупностью –10 мм – 80–120 кг/м^3; лигносульфонат натрия технический (ЛСТ) – 1–1,2 кг/м^3.

В ходе исследований определено, что в результате саморазогрева смеси в подземной камере температура твердеющего массива поднимается выше 40 °С. При такой температуре проявляются вяжущие свойства сульфидов. Установлено, что в первые сутки выдержки образцов происходят их твердение и удаление избыточной влаги. Прочность в образцах нарастает тем интенсивнее, чем выше температура разогрева массива в процессе твердения и чем меньше срок хранения извести после обжига. Проявление при высоких температурах собственной активности хвостов позволяет отказаться от дорогостоящих цементов и шлаков.

Закладочные смеси на основе извести и отходов обогащения медноколчеданных руд обеспечивают: необходимую для отработки запасов в различных горно-геологических условиях прочность (1,5–4 МПа) искусственного массива; хорошую пластичность и благоприятные деформационные характеристики, высокие реологические свойства, отсутствие расслаиваемости, сохранение несущей способности целиков при нагрузках, в 5–7 раз превышающих предел упругости.

Поскольку в 1-й серии опытов было установлено, что увеличение расхода извести позволяет повысить прочностные характеристики образцов закладочного массива, во 2-й серии опытов было оценено влияние расхода обожженных в лабораторных условиях карбонатных пород (80; 120 и 160 кг на 1 м^3 закладочной смеси) на прочностные характеристики закладочного массива. Анализ полученных данных выявил нецелесообразность превышения расхода извести более чем 120 кг/м^3 (см. табл. 1 и

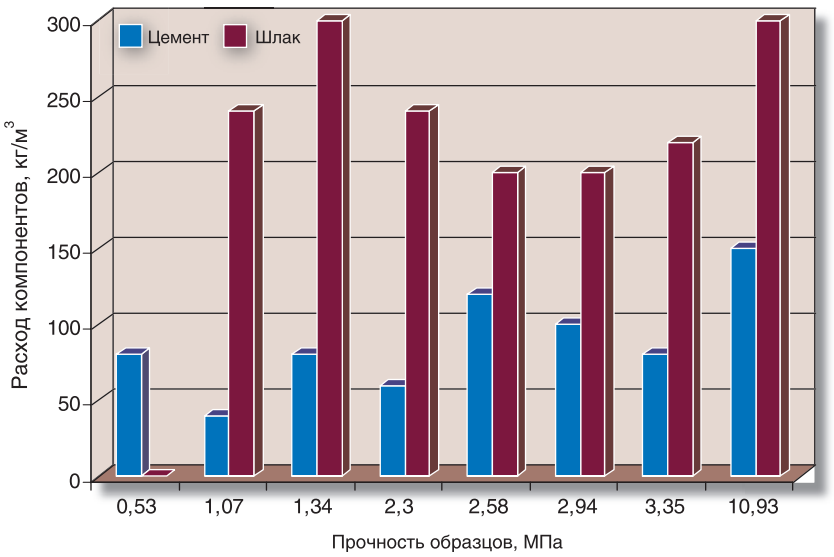

Рис. 1. Влияние состава твердеющей смеси на прочность изготовленных из нее образцов в возрасте 28 сут

Таблица 1. Составы смесей и результаты испытаний на прочность образцов (2-я серия опытов)

Номер опыта	Расход, кг/м³			Прочность на сжатие, МПа, по истечении			
	вяжущего (известь, обожженная в лабораторных условиях)	заполнителя (обезвоженные текущие хвосты)	ЛСТ	7 сут	14 сут	28 сут	60 сут
2.1	80	2070	1	0,1	0,98	1,3	1,95
2.2	120	2010	1,2	0,1	1,4	1,82	2,5
2.3	160	1960	1,3	0,05	1,37	1,63	2,3

рис. 2, *а*). Прочность закладки при введении вяжущего в количестве 160 кг/м³ смеси составила на 60-е сутки 2,3 МПа, что несколько ниже, чем прочность образцов, сформированных из смеси состава № 2.2.

По результатам 1-й и 2-й серии опытов можно заключить, что закладочная смесь рационального состава должна содержать 120 кг/м³ свежеобожженной и измельченной извести.

В 3-й серии опытов было оценено влияние гранулометрического состава обожженных отходов добычи карбонатных пород на характеристики закладочного массива. Анализ полученных данных и динамики набора прочности образцов (см. рис. 2, *б*) свидетельствуют, что наилучшие результаты достигаются при использовании извести крупностью менее 10 мм (состав № 3.2). Использование вяжущего крупностью –1–0 мм (состав № 3.1) позволяет сформировать массив прочностью не более 1 МПа при продолжительности набора прочности 60 сут. Использование фракций крупностью –1 мм менее эффективно из-за более низкого качества карбонатных пород тонких классов, а также большей гигроскопичности порошковой извести и частичной потери ею гидравлической активности еще до затворения в составе смеси. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности предварительного отсева тонких фракций карбонатных пород перед обжигом. Затворение комовой извести крупностью –40+20 мм и –20+10 мм (составы № 3.4 и 3.3) требует длительного перемешивания компонентов смеси для обеспечения полного гашения, что технологически нецелесообразно.

Таким образом, закладочные смеси на основе извести и отходов обогащения позволяют формировать массивы, пригодные для различных горнотехнических условий разработки. Для разработки технологических схем закладки выработанного пространства с их использованием необходима реструктуризация существующих закладочных комплексов в части доставки и подготовки исходных материалов.

Сдерживающим фактором широкого применения хвостов обогащения в технологии закладочных работ является присутствие в них ценных компонентов. С целью исключения потерь цветных металлов с хвостами обогащения медноколчеданных руд в закладке выработанного пространства разработана и прошла опытно-промышленную апробацию технологическая схема, предусматривающая предварительное выщелачивание ценных компонентов из хвостов обогащения*. Технология позво-

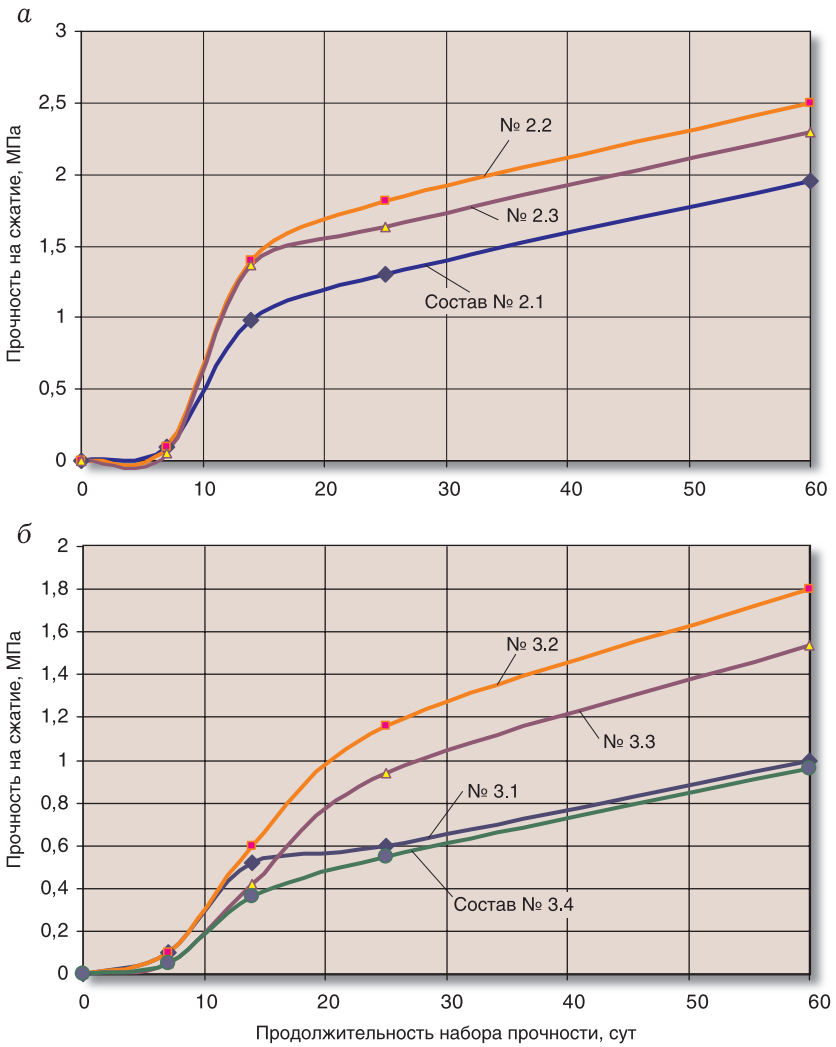

Рис. 2. Динамика набора прочности в образцах на основе известкового вяжущего и текущих хвостов обогащения:
а – 2-я серия опытов; *б* – 3-я серия опытов

**Опытно-промышленная* апробация технологии кучного выщелачивания хвостов обогащения медноколчеданных руд / М. В. Рыльникова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 2. С. 293–302.

Таблица 2. Составы закладочных смесей на основе известкового вяжущего и результаты испытаний на прочность кубических образцов

Номер состава	Расход, кг/м³					Прочность на сжатие, МПа, по истечении			
	вяжущего (известь)	заполнителя (текущие выщелоченные хвосты)		ЛСТ	воды	7 сут	14 сут	28 сут	60 сут
1	80	1650		1,8	420	0,1	0,15	0,42	1,41
2	80	165	1485	1,8	400	0,1	0,32	0,6	2,5
3	80	420	1230	1,8	380	0,11	0,38	0,6	1,54
4	80	660	990	1,8	300	0,1	0,25	0,5	2,6
5	80	1700		1,8	400	0,095	0,27	0,67	1,25

Примечание. Красным цветом в таблице выделены данные, относящиеся к активированным выщелоченным хвостам обогащения.

ляет после доизвлечения ценных компонентов использовать такие отходы для формирования закладочных массивов с заданными механическими характеристиками и обеспечивает высокую полноту, безопасность и эффективность освоения недр.

Анализ химического состава отходов выщелачивания хвостов обогащения медноколчеданных руд свидетельствует о возможности и целесообразности их использования в составе закладочной смеси.

Механические характеристики закладочного массива изучались в двух сериях опытов на образцах, изготовленных на основе известкового и известково-шлакового вяжущего в сопоставлении с эталонными образцами, изготовленными на основе цемента.

Составы закладочных смесей 1-й серии опытов приведены в табл. 2. Расход извести для каждого состава был принят минимальным по результатам предварительных исследований – 80 кг/м³. Варьировался расход заполнителя – хвостов обогащения после выщелачивания. В ходе экспериментов была также оценена возможность повышения механической прочности закладочного массива путем механоактивации доли (0; 10; 25; 40 и 100 %) отходов выщелачивания путем их тонкого помола непосредственно перед введением в закладочную смесь.

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о достаточной прочности образцов на основе извести и хвостов обогащения после выщелачивания по фактору устойчивости вертикальных обнажений.

Механоактивация текущих хвостов дала положительный результат (рис. 3): прочность образцов закладки повысилась в среднем в 2 раза. Причем активация текущих хвостов в количестве 10 и 40 % от общего расхода твердой фазы позволяет получить закладочный массив с устойчивой высотой вертикального обнажения до 60 м.

Результаты испытаний деформационных характеристик образцов в динамическом режиме путем прозвучивания на приборе УКБ-1М дали следующие результаты. Увеличение до 25 % доли текущих хвостов, прошедших механоактивацию, приводит к улучшению деформационных характеристик – модуль деформации повышается на 18 %, при этом на 25 % увеличивается значение коэффициента Пуассона, что свидетельствует о лучшем сопротивлении закладочного массива вертикальным нагрузкам и повышении устойчивости его вертикальных и горизонтальных обнажений. Механоактивация всего объема хвостов приводит к снижению значения коэффициента Пуассона и модуля деформации массива, что указывает на целесообразность механоактивации в объеме 10– 25 %. В этом случае механоактивация хвостов обогащения после выщелачивания улучшает деформационные характеристики массива, повышая значения относительного коэффициента поперечных деформаций в 1,3–1,5 раза, что обеспечивает сохранение несущей способности закладочного массива при нагрузках, в 5–7 раз превышающих предел упругости. Разрушение образца происходит в виде откола в основном по боковым поверхностям, при этом сплошность и несущая способность образца в центральной части сохраняются (рис. 4).

Во 2-й серии опытов исследовались составы закладочной смеси на основе известково-шлакового вяжущего с расходом: извести – 80 кг/м³, свежеизмельченных шлаков медной плавки – 120; 160 и 200 кг/м³. В качестве заполнителя использовались текущие хвосты после выщелачивания, в различных пропорциях прошедшие механоактивацию (табл. 3).

Испытания на сжатие образцов составов № 6–8 (см. табл. 3), приготовленных из промытых водой после выщелачивания хвостов обогащения, показали более высокий результат при расходе шлака 160 и 200 кг/м³: прочность образцов на 60-е сутки составила соответственно 1,46 и 1,62 МПа, на 90-е сутки – 1,6 и 1,95 МПа, что обеспечивает устойчивость вертикальных обнажений закладочного массива высотой 40 и 60 м. Составы на основе известково-шлакового вяжущего при расходе извести и измельченного шлака 160 и 200 кг/м³ дают прочность образцов в 1,5–2 раза выше, чем составы с расходом шлака 120 кг/м³. Прочность образцов составов № 7 и 8 сопос-

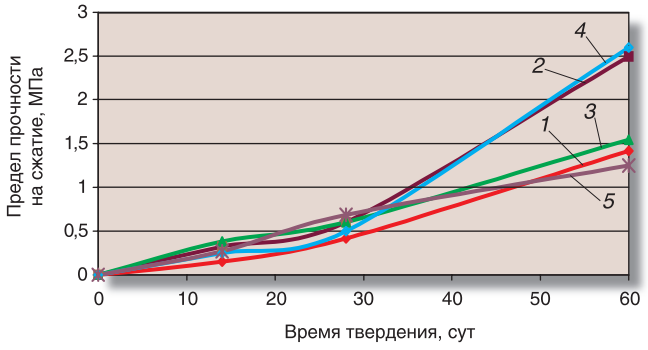

Рис 3. Динамика набора прочности в образцах на основе известкового вяжущего и хвостов обогащения после выщелачивания (промытых водой) при расходе извести 80 кг/м³, текущих хвостов 1650 кг/м³:
1, *2*, *3*, *4*, *5* – доля механоактивированных хвостов соответственно 0; 10; 25; 40 и 100 %

Таблица 3. Составы закладочных смесей на основе известково-шлакового вяжущего и результаты испытаний на прочность кубических образцов

Номер состава	Расход, кг/м³					Прочность на сжатие, МПа, по истечении			
	вяжущего		заполнителя	ЛСТ	воды	14 сут	28 сут	60 сут	90 сут
	известь	шлак медной плавки	текущие хвосты						
6	80	120	1550	1,8	480	0,33	0,46	0,83	1,1
7	80	160	1510	1,8	510	0,5	0,99	1,46	1,6
8	80	200	1475	1,8	550	0,54	0,94	1,62	1,95
9	80	120	1550	1,8	500	0,6	0,98	1,25	1,4
10	80	160	1510	1,8	520	0,75	1,33	1,39	1,65
11	80	200	1475	1,8	540	0,56	1,19	2,02	2,3

Примечание. Красным цветом в таблице выделены данные, относящиеся к активированным текущим хвостам обогащения и шлакам медной плавки.

тавима в течение первых 28 сут хранения, при большем же сроке (60 и 90 сут) прочность образцов состава № 7 на 20 % ниже, чем № 8.

Оценка возможности увеличения прочности закладочного материала на основе известково-шлакового вяжущего и текущих хвостов обогащения после выщелачивания путем активации хвостов тонким измельчением на истирателе непосредственно перед приготовлением закладочной смеси (составы № 9–11) выявила возможность повышения прочности закладочного массива. В составах на основе активированных хвостов с расходом шлака 120 кг/м³ (состав № 9) на 90-е сутки прочность выше на 30 %, а с расходом 160 и 200 кг/м³ (составы № 10 и 11) – соответственно на 10 и 15 % по сравнению с составом без механоактивации. Причем качественно изменилась и динамика набора прочности, особенно у состава № 11 с большим расходом извести (200 кг/м³), где сопротивление на сжатие 2 МПа было достигнуто уже на 50–60-е сутки. Это указывает на целесообразность использования данных составов при сплошных слоевых или камерных системах разработки, когда существует необходимость раннего технологического обнажения массива для обеспечения требуемой интенсивности горных работ.

В ходе исследований установлено также, что при использовании для приготовления закладочной смеси текущих хвостов обогащения с расходом извести 80 кг/м³ и шлака 200 кг/м³ обеспечиваются более высокие значения модуля деформации и коэффициента Пуассона.

Составы на основе хвостов обогащения, извести и шлака медной плавки с расходом 80 и 120 кг/м³ с механоактивацией вяжущих свойств могут эффективно применяться при этажно-камерных системах разработки с восходящим порядком выемки запасов. Максимальные показатели прочности в сроки обнажения 28–60 сут обеспечивают составы на основе хвостов обогащения после выщелачивания с расходом извести 80 кг/м³ и активированных шлаков 200 кг/м³: на 60-е сутки прочность составляет 2,1 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, модуль деформаций – $(3\div4)\times10^3$ МПа.

Рис. 4. Внешний вид образца закладки, испытанного под нагрузкой, в 5 раз превышающей предел упругости

Полученные на основе отходов выщелачивания хвостов обогащения составы закладочной смеси могут быть использованы при освоении медноколчеданных месторождений в различных горно-геологических условиях системами разработки с поддержанием очистного пространства твердеющей закладкой. Сопоставление объемов ежегодного формирования подземных пустот и поступающих с фабрик отходов обогащения свидетельствует об их балансе и возможности полного складирования хвостов в выработанном пространстве подземного рудника.

На составы закладочных смесей, приготовляемых на основе отходов сернокислотного выщелачивания хвостов обогащения без использования цемента, получен патент РФ на изобретение (пат. РФ 2327874. Приоритет от 25.09.2006 г. Авторы М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко, И. А. Абдрахманов и др.).

Development of technologies for waste utilization as components of solid stowing mixtures

M. V. Rylnikova, D. N. Radchenko, V. V. Grigoriev, K. Zh. Rakhmatulina

The importance of copper pyrite ore of the Uralskaya pyrite formation and their liability to spontaneous combustion determine the necessity of application of mining technologies with stowing. Therefore, the development of technologies for the formation of artificial massifs from the available cheap stowing materials is very important for almost all underground mines in the region. The authors present the results of their research into the composition of stowing mixtures prepared on the basis of local materials, primarily production wastes, such as, copper-pyrite ore processing tails including those of sulfuric-acid leaching, copper melting slag, limestone and dolomite mining wastes, etc.

Key words: ***underground mining operations, mining with stowing, copper pyrite ores, production wastes, stowing mixture, copper pyrite ore leaching tails, stowing massif***