

А.М. Кузьменко, М.В. Петлёваный

## ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТАХ

*Рассмотрены вопросы влияния тонкого измельчения вяжущих веществ на прочность закладки и качество добытой руды в окружении искусственного массива. Проведена экономическая оценка технологии тонкого измельчения вяжущих веществ в зависимости от состава закладки, требуемой тонкости измельчения и стоимости закладочных материалов. Обоснована целесообразность применения технологии тонкого измельчения с учетом технологических и экономических факторов.*

---

## ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ТОНКОГО ПОДРІБНЕННЯ В'ЯЖУЧОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЗАКЛАДНИХ РОБОТАХ

*Розглянуто питання впливу тонкого подрібнення в'язучих речовин на міцність закладки та якість видобутої руди в оточенні штучного масиву. Проведена економічна оцінка технології тонкого подрібнення в'язучих речовин залежно від складу закладки, необхідної тонкості подрібнення та вартості закладних матеріалів. Обґрунтовано доцільність застосування технології тонкого подрібнення з урахуванням технологічних та економічних факторів.*

---

## SUBSTANTIATION THE EXPEDIENCY OF FINE GRIDDING OF CEMENTING MATERIAL DURING BACKFILL WORKS

*Influence of fine gridding cementing material on backfill strength and quality of mined ore around artificial rock massif is described. Economical evaluation of fine gridding technology of cementing material depending on backfill compound, required gridding fineness and cost of materials is carried out. Expedience of fine grinding technology usage taking into account technological and economical factors is justified.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Мировой и отечественный опыт подземной разработки руд ценных черных и цветных металлов показывает, что основным приоритетным направлением развития горных работ является внедрение различных вариантов систем разработки с твердеющей закладкой, при которых достигаются хорошие технико-экономические

показатели. Системами разработки с твердеющей закладкой в странах СНГ добывается 25% руд цветных и черных металлов, в Австралии – 30%, Канаде – 40%, Финляндии – 85%, во Франции – 87% [1]. Это свидетельствует об эффективности применения этих систем разработки, несмотря на дополнительные расходы, которые перекрываются качеством полученной продукции и отсутствием затрат на обогащение. Успешное внедрение систем разработки с

закладкой обеспечивает полноту выемки руд при минимальных потерях и засорении, безопасность ведения горных работ, снижает экологическую нагрузку на промышленные регионы.

Технологические схемы получения закладочных смесей и их компоненты, а также оборудование для измельчения исходного материала не получили существенного преобразования с момента внедрения данного способа управления горным давлением. И это несмотря на то обстоятельство, что происходит постоянное понижение глубины горных работ и возрастает экономическая составляющая на приобретение закладочных материалов.

Научно-техническое направление по совершенствованию процессов приготовления закладочных смесей находится в стадии становления, но имеет важное научное и практическое значение, так как при больших объемах закладочных работ снижение себестоимости и повышение качества закладочного массива является актуальным вопросом.

Одним из направлений совершенствования составов твердеющей закладки являлась механическая или химическая активация компонентов закладки [2, 3]. Кроме этого нет конкретных критериев и не обоснована возможная область применения указанной технологии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение в закладочных смесях материалов, обладающих вяжущими или инертными свойствами, решает ряд вопросов, но имеет ограниченные возможности по причине недостаточной изученности взаимодействия химических элементов, затворённых водой в зависимости раскрытия связей и от поверхности частиц. Здесь находится мощный энергетический потенциал, который может дать существенное прибавление прочности искусственному массиву за счет создаваемых внутренних связей различного характера действия при

приложении внешних нагрузок, поэтому возможность тонкого измельчения вяжущих веществ необходимо рассматривать комплексно, учитывая технологические и экономические аспекты.

Активация вяжущих компонентов закладочной смеси возможна при увеличении удельной поверхности частиц и их дисперсности в начальной стадии приготовления закладочной смеси, разрывая природные сростки образований оксидов кальция и кремния от других химических образований. Таким образом, создадутся условия к формированию новых внутренних связей в закладочном массиве, которые будут оказывать влияние на его прочностные свойства.

В настоящей статье приводятся результаты исследований технологической и экономической составляющей применения тонкого измельчения в технологии формирования закладочных смесей. Увеличение дисперсности вяжущего вещества на стадии приготовления твердеющей закладки способствует:

- снижению расхода вяжущего материала;
- снижению общих энергозатрат на измельчение, что связано с уменьшением объемов измельчения вяжущего вещества при сохранении нормативной прочности;
- улучшению физико-механических и физико-химических свойств твердеющей закладки.

Это нашло подтверждение при проведении нами комплексного исследования влияния тонкодисперсных частиц вяжущих материалов на свойства твердеющей закладки для условий разработки Южно-Белозерского месторождения [2, 4]. В настоящее время на комбинате применяется следующий состав закладочной смеси: доменный гранулированный шлак – 20,8%, отходы флюсового производства – 38,3%, порода – 24,1%, вода – 16,6%. Тонкость помола доменного граншлака составляет 55 – 60% частиц крупностью  $-0,074$  мм, а удельная поверхность его частиц составляет порядка  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Динамика набора

прочности закладки во времени, на основе указанного состава представлена графиком 1 (рис. 1).

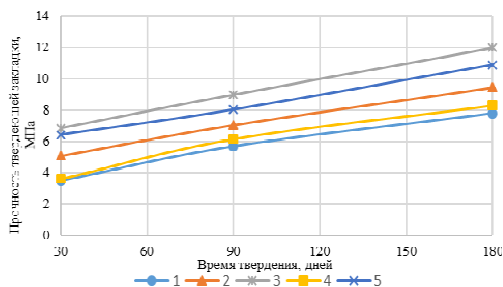


Рис. 1. Зависимость прочности твердеющей закладки от времени твердения: 1 – состав закладки, применяемый на ЗЖРК; 2 – вариант состава 1; 3 – вариант состава 2; 4 – вариант состава 3; 5 – вариант состава 4

Для установления рационального расхода вяжущего материала и его дисперсности при соблюдении нормативной прочности закладки нами варьировались эти показатели в разных составах, а результаты сравнивались с применяемым составом. В первом составе снижали расход граншлака в 1,5 раза с 20,8 до 13,9%, а удельную поверхность частиц увеличивали в 1,4 раза с 2000 до 2800 см<sup>2</sup>/г, результаты набора прочности представлены графиком 2; во втором снижали расход граншлака также в 1,5 раза с 20,8 до 13,9%, но увеличивали удельную поверхность частиц в 2,1 раза с 2000 до 4300 см<sup>2</sup>/г, результаты набора прочности представлены графиком 3; в третьем снижали расход граншлака в 3 раза с 20,8 до 6,95% и увеличивали удельную поверхность в 1,4 раза с 2000 до 2800 см<sup>2</sup>/г, результаты набора прочности данным составом представлены графиком 4; в четвертом снижали расход граншлака в 3 раза с 20,8 до 6,95%, но при этом увеличили удельную поверхность частиц в 2,1 раза с 2000 до 4300 см<sup>2</sup>/г, характер набора прочности данным составом представлен графиком 5. Во всех составах закладки сниженная часть расхода граншлака вос-

полнялась пропорциональным добавлением отходов флюса и дробленных пород. Далее в тексте эти составы именуются вариантами состава 1, 2, 3, 4.

Несомненным преимуществом наличия тонкодисперсных вяжущих в закладочных смесях является увеличения прочности. Кроме этого, с увеличением дисперсности происходит изменение структуры закладочного массива и возрастает его прочность на растяжение [5].

Обобщая результаты (рис. 1) видно, что при снижении расхода вяжущих материалов и повышении их дисперсности можно достичь более значительных прочностных характеристик закладки (графики 2 – 5) чем при применяемом составе на комбинате (график 1). При одинаковом расходе вяжущего материала, но при его разной дисперсности (графики 2, 3 и 4, 5) прочность закладки возрастает в 1,27 – 1,31 раза. В то же время ее прочность увеличивается только в 1,1 – 1,14 раз при одинаковой дисперсности, но разным расходе (графики 2, 4 и 3, 5).

Следовательно, расход вяжущего материала оказывает менее существенное влияние на прочность закладки по сравнению с величиной удельной поверхности частиц, значение которой в формировании прочности закладочного массива несравненно больше.

С прочностью закладочного массива связана также его устойчивость, от которой зависит качество добытой руды из междокамерных целиков. В условиях ЧАО ЗЖРК отработка запасов руд из междокамерных целиков в этаже 640 – 740 м велась через 2 – 3 года после отработки рудных целиков, поэтому необходимо учитывать прочность закладки в наиболее длительном сроке, чем является период в 180 дней. Обработка данных показала, что существует экспоненциальная связь с коэффициентом детерминации 0,75 между величиной разубоживания руды  $B$  и прочностью закладки  $\sigma$  в возрасте 180 дней (рис. 2).

Анализ графика на рис. 2 показывает,

что с увеличением прочности закладочного массива до 10 МПа в возрасте 180 дней повышается его устойчивость к обнажению и снижаются показатели разубоживания руды с 4,5 до 1,8%. Кроме этого убыток от попадания 1% закладочного материала в добытую руду оценивается в размере 7,2 грн/т. Увеличение прочности закладки положительно сказывается на технико-экономических показателях работы предприятия.

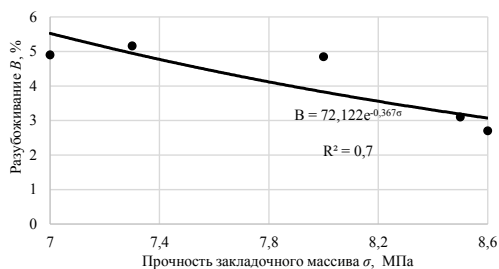


Рис. 2. Зависимость разубоживания добытой руды из камер второй очереди от прочности закладки выработанного пространства камер первой очереди отработки запасов

Экономическая составляющая применения тонкого измельчения заключается в снижении затрат на электроэнергию и снижении расхода вяжущих материалов.

В настоящее время на отечественных рудниках для приготовления твердеющей закладки применяют одностадийную схему с мокрым измельчением вяжущих материалов (в основном доменные граншлаки), что позволяет достигать крупность помола до 55 – 60% частиц  $-0,074$  мм. Чтобы повысить тонкость помола осуществляют доизмельчение вяжущего материала путем использования двухстадийной схемы измельчения.

Совершенствование процесса обогащения минерального сырья в горной отрасли проходит новый этап становления и знаменуется достижениями в создании эффективных энергосберегающих технологий. В частности, для процесса доизмельчения

ведущие мировые компании горной отрасли используют мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения производства Metso (США) серии VERTIMILL, SMD или производства Xstrata (Швейцария) серии IsaMill, которые хорошо зарекомендовали себя в области сверхтонкого измельчения на мировом горнодобывающем рынке.

Авторами статьи предлагается использовать этот опыт обогащения при ведении закладочных работ. При этом нами осуществлена попытка приближенного и предварительного экономического обоснования области применения тонкого измельчения.

Положительное влияние тонкого измельчения руд при обогащении на снижение затрат электроэнергии отмечается многими данными практики. Так, при крупности материала  $-0,074$  мм свыше 90%, измельченного мельницей IsaMill, удельный расход энергии составляет 9,1 кВт·ч/т, в то время как шаровые мельницы потребляют 15 – 20 кВт·ч/т, а в цикле доизмельчения расход энергии еще более повышается. По предварительным оценкам, IsaMill потребляет в 2 – 2,5 раза меньше электроэнергии на доизмельчение 1 т руды [6].

Исследования, проведенные компанией АММТЕС для схемы переработки магнетитовых руд месторождения в Западной Австралии, показали, что уместно использовать шаровую мельницу для помола до 100 мкм с содержанием 80% и последующим магнитным обогащением и с завершающим измельчением до 34 мкм в мельнице IsaMill [7]. При этом экономится около 60 МВт мощности (40% от общей мощности и  $\approx 50\%$  мощности для этапа измельчения) по сравнению с одностадийным циклом шаровой мельницы. Область применения мельниц IsaMill приведена в таблице.

Для приготовления твердеющей закладки на основе тонкодисперсных вяжущих частиц в технологической цепи закладочного комплекса может использоваться мельница модели IsaMill M5000, имеющая достаточную производительность (до 90 т/ч), крупность конечного продукта до 5 мкм и способная измельчать материалы

высокой твердости по шкале Мооса, в данном случае доменные гранулированные шлаки. Чтобы дать адекватную экономическую оценку работе мельницы во второй

стадии, необходимо руководствоваться энергетическими показателями измельчения, т. е. принимать во внимание крупность исходного продукта.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЛЬНИЦ VERTIMILL

Таблица

Параметр	Значение
Крупность входной фракции, мкм	75
Крупность конечного продукта, мкм	до 5
Производительность, т/ч	0 – 90 и более
Мощность двигателя, кВт	500 – 8000
Твердость по Моосу	до 10

Энергетические показатели при измельчении материалов разной крупности подробно изучены на лабораторной установке IsaMill 4 в работе [8]. Отмечается, что с возрастанием тонкости измельчения изменяется процент прохождения частиц и удельные энергозатраты. Подаваемый материал в мельницу IsaMill 4 при эксперименте содержал 60% частиц класса -0,08 мм, что в общих чертах соответствует тонкости измельчения шаровой мельнице в условиях закладочного комплекса ЗЖРК. Основываясь на полученные графики ориентировочные удельные энергетические затраты при увеличении дисперсности в 1,4 раза (с  $S_{\text{до}} = 2000 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $S_{\text{до}} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$ ) составят 5 кВт·ч/т, а при увеличении в 2,1 раза (с  $S_{\text{до}} = 2000 \text{ см}^2/\text{г}$  до  $S_{\text{до}} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$ ) – 12 кВт·ч/т. В условиях ЗЖРК при измельчении доменного гранулированного шлака одностадийной схемой затрачивается порядка 13 кВт·ч/т.

Для оценки экономических показателей применения тонкого измельчения сравниваем два варианта приготовления твердеющей закладки с одностадийным (мельница МШЦ 36×55) и двухстадийным измельчением вяжущего материала (МШЦ 36×55 и IsaMill). При двухстадийной схеме измельчения рассматривается также несколько вариантов: когда расход вяжущего в закладочной смеси снижен в 1,5 раза, а дисперсность увеличена в 1,4 раза; расход снижен в 1,5 раза, дисперсность увеличена

в 2,1 раз; расход снижен в 3 раза, дисперсность увеличена в 1,4 раза; расход снижен в 3 раза, дисперсность увеличена в 2,1 раза (см. рис. 1).

Важным аспектом является то, что если снижается расход вяжущего в смеси, то уменьшаемое количество вяжущего заменяют инертным наполнителем или пластифицирующими добавками. От этого в значительной степени зависит экономическая эффективность технологии тонкого измельчения, так как в случае дорогостоящего инертного наполнителя, которым заменяется сниженная часть вяжущего материала она снижается, поэтому необходимо рассматривать влияние е разной стоимости компонентов для установления области применения технологии тонкого измельчения. Таковым является соотношение стоимости вяжущего материала  $C_{\text{вяж}}$  и инертного наполнителя  $C_{\text{ин.зап}}$ . За последние 5 лет стоимость доменного гранулированного шлака изменилась на 8%, а отходов флюса на 32%, поэтому принимаем стоимость вяжущего материала постоянной  $C_{\text{вяж}} = \text{const}$ , а инертного наполнителя – переменной. В технологии закладочных работ широко используются комбинированные вяжущие и инертные материалы, в частности в условиях ЗЖРК инертным материалом служат отходы флюса и дробленные породы в соотношении 1,6:1. Следовательно, для вывода полной стоимости комбинированного инертного наполнителя использу-

ем выражение

$$C_{ин.зап.} = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2 + \dots + C_n Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}, \text{ грн/т,}$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – стоимость 1, 2 и  $n$ -го инертного заполнителя, грн/т;

$Q_1, Q_2, Q_n$  – расход 1, 2 и  $n$ -го инертного заполнителя в закладочной смеси, т/м<sup>3</sup>.

Далее моделируется изменение затрат на твердеющую закладку в зависимости от соотношения стоимостных показателей  $C_{вяж}/C_{ин.зап.}$ . Статьями затрат принята стоимость компонентов твердеющей закладки и электроэнергия на измельчение, доля которых составляет 70% в себестоимости закладочных работ. Стоимость воды на затворение смеси составляет 0,004% от стоимости закладки, поэтому в расчете данная категория не учитывается. При моделировании затрат учитывались следующие параметры: стоимость вяжущих и инертных материалов, их расход в смеси, соотношение компонентов, стоимость электроэнергии I и II стадий измельчения. Результаты изменения затрат на закладку (компоненты + электроэнергия) в зависимости от стоимостных показателей  $C_{вяж}/C_{ин.зап.}$  приведены на рис. 3.

Анализ графиков рис. 3 показывает, что при  $C_{вяж} = const$  затраты на закладку уменьшаются с понижением полной стоимости инертного заполнителя. Чтобы установить область применения технологии тонкого измельчения, необходимо варианты с двухстадийным измельчением (графики 2 – 5) сравнить с исходным вариантом одностадийного измельчения (график 1), при этом точкой пересечения графиков является уравнивание затрат при одно- и двухстадийном измельчении. Область рационального применения технологии тонкого измельчения для варианта состава 1 (график 2) начинается при  $C_{вяж}/C_{ин.зап.} = 0,98$ ; для варианта состава 2 (график 3) –  $C_{вяж}/C_{ин.зап.} = 1,25$ ; для варианта состава 3 (график 4) –  $C_{вяж}/C_{ин.зап.} = 0,91$ ; для вариан-

та состава 4 (график 5) –  $C_{вяж}/C_{ин.зап.} = 0,93$ . Из изложенного следует, что для каждого варианта состав 1, 2, 3, 4 существует своя область применения, которая зависит от состава закладки, требуемой тонкости помола и стоимости закладочных материалов.

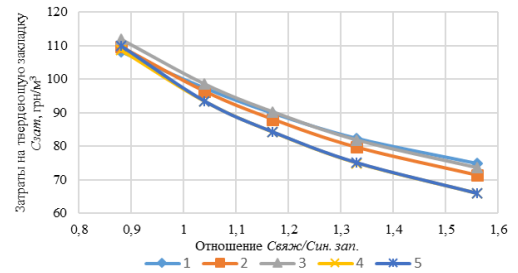


Рис. 3. Зависимость затрат (материалы + измельчение) от соотношения  $C_{вяж}/C_{ин.зап.}$ : 1 – одностадийное измельчение, состав закладки, применяемый на ЗЖРК; 2 – двухстадийное измельчение, вариант состава 1; 3 – двухстадийное измельчение, вариант состава 2; 4 – двухстадийное измельчение, вариант состава 3; 5 – двухстадийное измельчение, вариант состава 4

Для производства закладочных работ в условиях ЗЖРК рациональным является вариант (график 5), при котором формируется закладочный массив прочностью 11 МПа в возрасте 180 дней, разубоживание руды при отработке камер второй очереди может быть снижено до 1,3%, а при отношении свыше  $C_{вяж}/C_{ин.зап.} = 0,93$  проявляется экономический эффект от технологии тонкого измельчения. При этом, если существующую полную стоимость инертного заполнителя уменьшить на 7% затраты начнут снижаться, и достигнут равенства с одностадийным измельчением. Дальнейшее уменьшение полной стоимости инертного заполнителя для этого варианта 5, например, на 20% способствует снижению затрат на закладку на 8% в сравнении с одностадийным измельчением.

Подводя итоги, следует отметить, что для эффективного применения технологии тонкого измельчения необходимо подби-

рять и добавлять в закладочную смесь альтернативные материалы в количестве 20 – 30% от веса инертного заполнителя, снижающие полную его стоимость. Таковыми материалами могут являться вскрышные суглинки карьеров, известняковый щебень, гранитный отсев и др.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по обоснованию целесообразности применения технологии тонкого измельчения при производстве закладочных работ позволило установить следующие результаты:

1. Применение технологии тонкого измельчения в закладочных работах позволяет увеличить прочность закладочного массива до 11 МПа в возрасте 180 дней, повысить его устойчивость к обнажению и снизить показатели разубоживания руды с 4,5 до 1,3%.

2. Для технологии тонкого измельчения в зависимости от состава закладки, требуемой тонкости помола и стоимости закладочных материалов существует различный предел применимости, выше которого снижаются затраты на производство закладочной смеси. Оценку области применения

технологии тонкого измельчения необходимо производить по снижению затрат на закладку (компоненты + электроэнергия) в зависимости от соотношения стоимостных показателей вяжущего и инертных материалов  $C_{вяж}/C_{ин.зап}$ .

3. Для производства закладочных работ в условиях ЗЖРК рациональным является двухстадийное измельчение вяжущего материала, при котором его расход в закладочной смеси снижен в 3 раза, а дисперсность увеличена в 2,1 раза. В этом случае формируется закладочный массив прочностью 11 МПа в возрасте 180 дней, разубоживание руды при отработке камер второй очереди может быть снижено до 1,3%, а при отношении свыше  $C_{вяж}/C_{ин.зап} = 0,93$  проявляется экономический эффект от технологии тонкого измельчения.

4. Эффективное применение технологии тонкого измельчения осуществимо при добавлении в закладочную смесь альтернативных материалов в количестве 20 – 30% от веса инертного заполнителя, снижающие полную его стоимость. Таковыми материалами могут служить вскрышные суглинки карьеров, известняковый щебень, гранитный отсев и др.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / В.П. Кравченко, В.В. Куликов. – М.: Недра, 1974. – 200 с.
2. О механическом измельчении компонентов твердеющей закладки для заполнения выработанного пространства рудников / М.В. Петлёванный, А.М. Кузьменко, Л.Ж. Горбеев [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 3. – С. 75 – 78.
3. Волощенко В.П. Геомеханические основы разработки мощных железорудных месторождений системами с закладкой: дисс. ...доктора техн. наук: спец. 05.15.02 / Волощенко Владимир Петрович. – Д., 1985. – 314 с.
4. Петлёванный М.В. Управление структурой твердеющей закладки при подземной добыче железных руд / М.В. Петлёванный // *Разработка рудных месторождений: науч.-техн. сб.* – Кривой Рог: КНУ, 2012. – Вып. 95(1). – С. 198 – 202.
5. Петлёванный М.В. Влияние структуры закладочного массива на его прочность / М.В. Петлёванный // *Школа подземной разработки: сб. науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф.* – Д.: ЛізуновПрес, 2012. – С. 253 – 258.
6. Интенсификация технологий разупрочнения и дезинтеграции полидисперсных минеральных комплексов различного генезиса с использованием мельниц Isamill / Н.В. Николаева, А.О. Ромашев, Т.Н. Александрова [и др.] // *Горный информационно-аналитический*

бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 97 – 101.

7. Оптимизация схемы переработки магнетитовых руд месторождения в Западной Австралии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isamill.com/EN/Downloads>.

8. Stirred milling technologies [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.isamill.com/EN/Downloads>.

## ОБ АВТОРАХ

Кузьменко Александр Михайлович – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Петлёваный Михаил Владимирович – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.