



УДК 622.273.217.4

Наука

Кузьменко А.М. /д.т.н./, Петлёваный М.В.

ГВУЗ «НГУ»

## Формирование закладочного массива на основе тонкодисперсных частиц вяжущих материалов при подземной разработке рудных месторождений

Определены устойчивые структурные связи закладочного массива в зависимости от дисперсности и удельной поверхности частиц вяжущих компонентов. Установлено образование различных форм структурных связей в закладочном массиве под влиянием дисперсности вяжущего материала. Ил. 3. Библиогр.: 3 назв.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, закладочный массив, вяжущий материал, структурные связи, дисперсность

*Determination of stable structural connections of filling massif, depending on the fineness and specific density of the cementing components particles surface, is given. The formation of various forms of structural connections in filling massif under the influence of the dispersion of cementing materials is defined.*

**Keywords:** ore deposits, filling massif, cementing components, structural connections, dispersity

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Увеличивающаяся глубина подземной разработки рудных месторождений и их сложные горно-геологические условия требуют применения камерных систем разработки с твердеющей закладкой, обладающей большой прочностью и устойчивостью к интенсивности проявления горного давления и сейсмическому воздействию взрывных работ. В большинстве случаев прочность закладочного массива достигается за счет совершенствования состава твердеющей смеси и увеличения в ней вяжущих веществ.

Добавление в состав закладочной смеси дорогостоящего портландцемента, не всегда позволяет получить желаемую прочность, так как искусственный массив работает как на сжатие, так и на растяжение. Возникновение тех или иных напряжений на контуре очистных камер зависит от их конфигурации, а, следовательно, создаваемый массив с постоянными физико-химическими связями воспринимать эти нагрузки не в состоянии. Для устойчивости обнажения закладочного массива необходимо создавать внутренние структурные связи, которые должны работать при разных напряжениях.

Следует отметить, что в последние десятилетия стоимость материалов, применяемых для приготовления закладочной смеси, постоянно возрастает, а информация в литературных источниках об исследованиях по формированию устойчивых структурных связей в массиве отсутствует.

Таким образом, формирования устойчивых структурных связей в твердеющей закладке под влиянием тонкодисперсных вяжущих веществ является новой важной научной задачей и актуальной для горнорудной промышленности.

### Анализ исследований и публикаций

Повышению эффективности использования твердеющей закладки при камерных системах разработки посвящены исследования Волощенко В.П. [1], Основными направлениями совершенствования закладочных работ он считал механоактивацию или химическую активацию компонентов закладочной смеси с переходом на двухстадийную схему измельчения вяжущего материала. В состав закладочной смеси входят шлаки металлургического передела, флюсовые известняки и горные породы. В настоящее время отсутствуют работы по исследованию изменения структуры и прочности твердеющей закладки с увеличением удельной поверхности частиц вяжущего материала.

### Постановка задач

Химическая 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.

Исследование влияния удельной поверхности частиц на прочность твердеющей закладки проводилось на составе закладочной смеси, применяемого на Запорожском железорудном комбинате (ЗЖРК). При прочности закладочного массива 6-7 МПа наблюдаются случаи его разрушения в днище и бортах заложённых камер, что свидетельствует о недостаточной прочности твердеющей закладки. Состав закладочной смеси следующий, %: доменный гранулирован-

ный шлак 18,1; флюсовый известняк 47,5; порода 16,3; вода 18,1. Тонкость измельчения шлака в шаровой мельнице составляет 50-60 % частиц класса 0,074 мм, что соответствует удельной поверхности порядка 2000 см<sup>2</sup>/г.

**Изложение основного материала исследования**

Для исследования влияния удельной поверхности частиц на прочность закладочных смесей доменный гранулированный шлак и известняк флюсовый были измельчены в лабораторной струйной установке УСИ-20 до удельной поверхности 2800, 4300 и 6600 см<sup>2</sup>/г. Значения удельной поверхности определялись на приборе В.В. Товарова.

В лабораторных условиях испытано 12 составов закладочных смесей при расходе доменного шлака 100, 200, 300 кг/м<sup>3</sup>. При каждом его расходе пошагово изменяли удельную поверхность 2000, 2800, 4300, 6600 см<sup>2</sup>/г. Для приготовления состава твердеющей закладки добавляли измельченный флюсовый известняк в количестве 50 % от расхода доменного шлака в качестве микро-наполнителя с удельной поверхностью, аналогичной шлаку [2].

При тонком измельчении доменного шлака образованная поверхность частицы имеет высокую реакционную способность, обусловленную накоплением

вод, что на поверхности измельченных частиц шлака образуется большее число ионов кальция Ca<sup>2+</sup> чем ионов Si<sup>4+</sup>. Значительная часть связей Si-O находится в инертном состоянии. По своей природе ковалентная связь Si-O является одной из прочных, поэтому многие силикатные материалы характеризуются высокой твердостью. Чтобы разрушить большее количество связей Si-O, высвободить ионы кремния и задействовать их в процесс гидратации вяжущего материала необходимо увеличить степень дисперсности частиц, что также увеличит растворимость частиц силикатов кальция.

Из этого следует, что необходимо содержащиеся в силикатах кальция не разрушенные связи Si-O преобразовать из инертного в активное состояние для вовлечения ионов кремния в процесс формирования гидросиликатов кальция и увеличения содержания в их конечной структуре прочной ковалентной связи.

Для определения изменения структурных связей закладочного массива используем методы инфракрасной спектроскопии и растровой электронной микроскопии.

Инфракрасные спектры образцов компонентов закладки получали на приборе SPECORD-75IR. С целью исследования различия в структурных особенностях

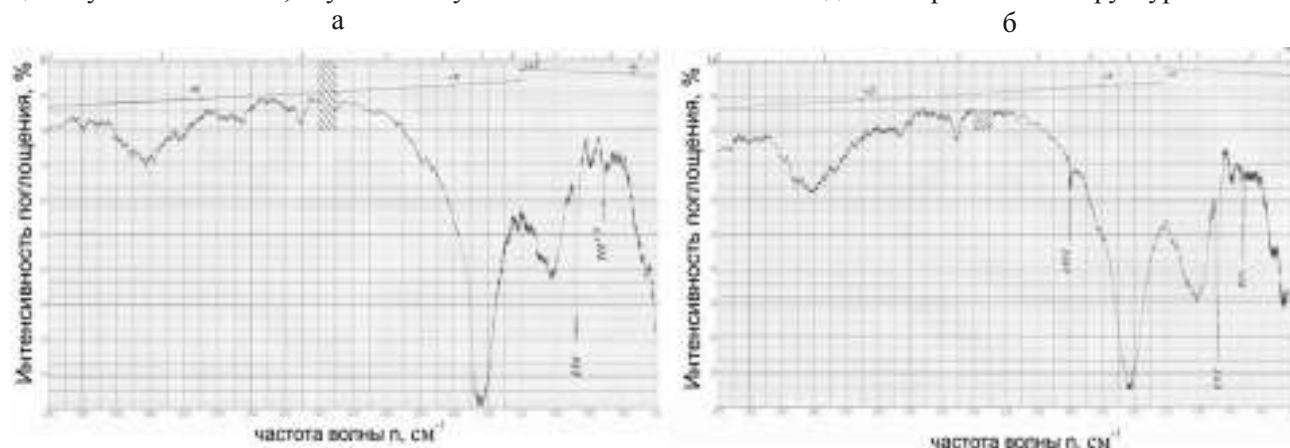


Рис. 1. Инфракрасные спектрограммы образцов твердеющей закладки: а – при удельной поверхности вяжущего материала S<sub>уд</sub> = 2800 см<sup>2</sup>/г; б - при удельной поверхности вяжущего материала S<sub>уд</sub> = 4300 см<sup>2</sup>/г

поверхностной энергии. Особое энергетическое состояние новых поверхностей измельченных минеральных материалов - кварца, известняка, магнезита, гипса и др. можно объяснить образованием большого количества ненасыщенных валентных связей. При измельчении кристаллов кварца в результате разрыва значительного количества связей Si - O на поверхности зерен образуются ионы Si<sup>4+</sup>, O<sup>2-</sup> [3].

Главными минералами доменного шлака являются силикаты кальция, а содержание оксидов CaO и SiO<sub>2</sub> составляет 85 % и более, поэтому в структуре шлаковых минералов при шаровом помоле до удельной поверхности 2000 см<sup>2</sup>/г происходит разрушение преимущественно ионных Ca-O и ковалентных Si-O связей. Энергия данных типов связей составляет 1075,6 и 1861 кДж/моль соответственно, что свидетельствует о большей подверженности ионных связей Ca-O к разрушению, чем Si-O. Можно сделать вы-

сках твердеющей закладки с увеличением удельной поверхности снимались ИК спектры образцов закладки с удельной поверхностью вяжущего материала 2000 и 4300 см<sup>2</sup>/г (рис. 1).

При сравнении спектрограммы образцов твердеющей закладки разной удельной поверхности вяжущего материала (Рис. 1.а,б) наблюдается усиление интенсивности полосы поглощения в области 900-1000 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о возрастании прочной ковалентной связи Si-O и снижении слабой ионной связи Ca-O. Из этого следует, что происходит упрочнение твердеющей системы и увеличение степени закристаллизованности связей гидросиликатов кальция. Усиление полосы в области 3400-3600 см<sup>-1</sup> свидетельствует об увеличении количества новообразующихся гидросиликатов кальция в структуре закладки.

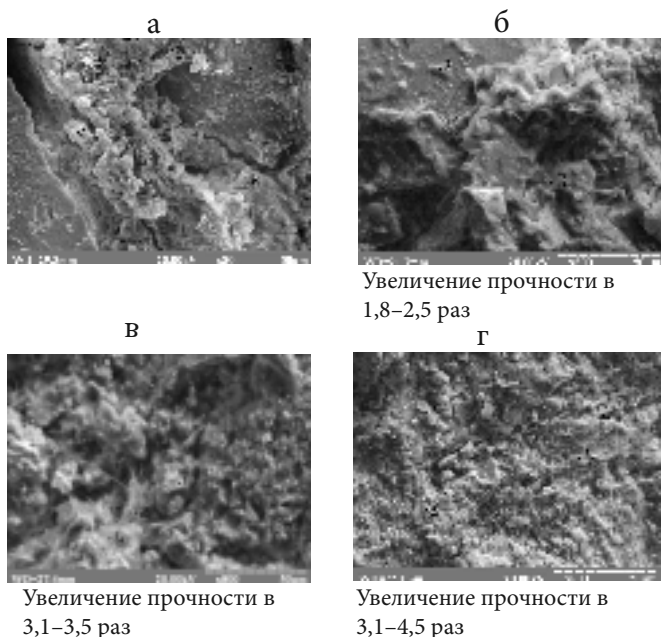
Исследования структурных связей закладочного массива проводили с помощью растрового электрон-

ного микроскопа РЕММА-102-02. Исследовали образцы твердеющей закладки с удельной поверхностью вяжущего материала 2000, 2800, 4300, 6600 см<sup>2</sup>/г.

В результате исследования изломов образцов твердеющей закладки обнаружен ряд структурных особенностей новообразований при различной величине удельной поверхности шлака и известняка, отличающихся, формой, химическим составом и степенью влияния на прочность (рис. 2). Новые вещества называют гидросиликатами кальция, образующиеся в процессе гидратации минералов доменного шлака.

На рис. 2а-г видно, что структура твердеющей закладки изменяется с повышением дисперсности шлака и известняка в направлении уменьшения размеров кристаллических новообразований. Следует отметить, что в условиях ЗЖРК (рис. 2а) структура закладочного массива в возрасте 90 дней представлена гидросиликатным гелем, отсутствуют прочные кристаллические структуры, что увеличивает вероятность его разрушения. Увеличение удельной поверхности способствует появлению кристаллических связей в структуре твердеющей закладки (рис. 2б-г), снижается пористость. Эти факторы способствуют повышению устойчивости закладочного массива.

На прочность твердеющей закладки значительное влияние оказывает соотношение  $CaO/SiO_2$  в структурных связях. При  $CaO/SiO_2 \geq 1,5$  формируются высокоосновные гидросиликаты кальция, при  $CaO/SiO_2 \leq 1,5$  – низкоосновные.

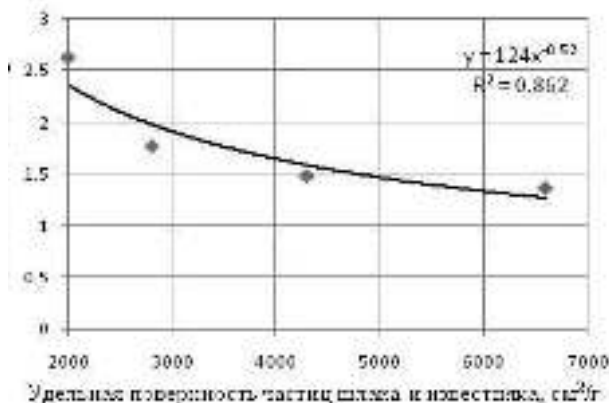


**Рис. 2. Эволюция структурных связей в твердеющей закладке в зависимости от удельной поверхности частиц шлака и известняка:** а – гелеобразная структура (при  $S_{уд} = 2000$  см<sup>2</sup>/г); б – крупноиглообразная структура ( $S_{уд} = 2800$  см<sup>2</sup>/г); в – иглообразная структура (при  $S_{уд} = 4300$  см<sup>2</sup>/г); г – слоисто-пластинчатая ( $S_{уд} = 6600$  см<sup>2</sup>/г)

Наибольшую прочность имеют кристаллы низкоосновных гидросиликатов кальция. Прочность нитевидных гидросиликатов кальция на растяжение с основностью  $CaO/SiO_2 \geq 1,5$  меньше, чем 1,5 достигает 1350 МПа, а высокоосновных ( $CaO/SiO_2 \geq 1,5$ ) 770 МПа [3]. Если закладочный массив в своей струк-

туре будет содержать иглообразные низкоосновные гидросиликаты кальция, увеличится его прочность на растяжение. Следовательно, одним из путей создания прочного закладочного массива является формирование гидросиликатов кальция с основностью  $CaO/SiO_2$  близкой к 1.

Для установления типа основности гидросиликатов кальция в структуре закладочного массива были произведены замеры содержания оксидов  $CaO$  и  $SiO_2$  с помощью встроенного в микроскоп микрорентгеноспектрального анализатора. На рис. 2а-г точки замеров отмечены арабскими цифрами. В ходе выполнения замеров было замечено, что величина основности заметно снижается с увеличением удельной поверхности частиц шлака и известняка. Обработка данных замеров  $CaO$  и  $SiO_2$  позволила установить степенную зависимость основности связей закладочного массива от величины удельной поверхности частиц, которая представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость основности связей от величины удельной поверхности**

Анализ зависимости, приведенной на рис. 3, позволяет сделать вывод, что увеличение удельной поверхности шлака и части известняка в твердеющей закладке с 2000 до 6600 см<sup>2</sup>/г сопровождается изменением формы химических связей, приводит к преобразованию высокоосновных гидросиликатов кальция в низкоосновные и выражается степенной зависимостью. Это позволит управлять структурой твердеющей закладки и повысит прочность закладочного массива.

Установленные структурные связи закладочного массива могут быть использованы для повышения его устойчивости. Его структура с иглообразно-волокнистыми связями наиболее устойчива к растяжению. Игольчатые связи распределяются в искусственном камне неопределенно. Иглы и волокна взаимопересекаются, создавая армирование твердеющей системы и повышение силы сцепления между кристаллами. Данная структура образуется при удельной поверхности доменного шлака свыше 4000 см<sup>2</sup>/г.

При воздействии сжимающих напряжений, целесообразно использовать твердеющую закладку со слоистой структурой новообразований. Горизонтальное расположение слоисто-пластинчатых гидросиликатов кальция в структуре закладки повышает со-

противляемость искусственного массива к сжатию. Данная структура достигается при удельной поверхности доменного гранулированного шлака и известняка свыше 5500 см<sup>2</sup>/г. В результате вышеописанного появляется возможность управления структурой закладочного массива.

Увеличение удельной поверхности вяжущего материала может быть достигнуто за счет применения двухстадийной схемы измельчения с использованием новой мельницы сверхтонкого мокрого измельчения. К такой мельнице относят серию IsaMill (Австралия), которая позволяет получать конечный продукт до 5-20 мкм, что позволит обеспечить удельную поверхность доменного шлака и известняка в диапазоне 2800-5500 см<sup>2</sup>/г. За последние годы указанные мельницы показали высокую эффективность использования в горной промышленности ведущих стран мира при обогащении полезных ископаемых.

#### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

1. Увеличение удельной поверхности шлака и части известняка в твердеющей закладке с 2000 до 6000 см<sup>2</sup>/г сопровождается изменением формы химических связей, приводит к преобразованию высокоосновных гидросиликатов кальция в низкоосновные и выражается степенной зависимостью. Это позволит управлять структурой твердеющей закладки и повысит прочность закладочного массива.

2. Игольчато-волокнистая структура закладочного массива наиболее устойчива к растяжению, слоисто-пластинчатая к сжатию. Следовательно, заполнять выработанное пространство составами твердеющей закладки с вышеуказанной структурой рекомендуется в областях концентрации растягивающих

и сжимающих напряжений, возникающих при обработке камер, что повысит устойчивость закладочного массива.

Дальнейшее совершенствование технологии закладочных работ на основе мелкодисперсной твердеющей закладки может определяться следующими направлениями:

- замена инертного заполнителя, на который затрачивается 60 % от стоимости компонентов закладки альтернативным материалом;
- дополнительное извлечение железа при измельчении горной породы в качестве инертного заполнителя.

#### **Библиографический список**

1. Волощенко В.П. Геомеханические основы разработки мощных железорудных месторождений системами с закладкой: Дис. ...доктора техн. наук. Днепропетровск, 1985. – 314 с.

2. Кузьменко А.М. Петлеваний М.В., Усатый В.Ю. Влияние тонкоизмельченных фракций шлака на прочностные свойства твердеющей закладки / Школа підземної розробки: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., вересня 2010 р./ редкол.: В.І.Бондаренко та інш. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2010. – С. 278–284.

3. Таймасов Б.Т. Технология производства портландцемента: Учеб. пособие. – Шымкент: Изд-во ЮКГУ, 2003. - 297 с.

**Поступила 19.12.2012**



### **ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!**

В редакции можно приобрести по льготной цене авторские экземпляры журнала. Просим заблаговременно подать заявку для формирования тиража.

**контактный телефон (факс) 0562-46-12-95**