

ВВЕДЕНИЕ

*К 115-летию кафедры подземной разработки
месторождений*

Камерные системы разработки с твердеющей закладкой эффективно применяются в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях залегания крутопадающих рудных залежей, снижают потери и разубоживание руды и повышают безопасность ведения горных работ. С увеличением глубины разработки усложняются горно-геологические условия, возрастает интенсивность проявления горного давления, происходят обрушения закладочного массива, заметно проявляется влияние сейсмических нагрузок от взрывных работ. Это создает условия, при которых необходимо повышать прочность закладочного массива и его устойчивость, снижая затраты на формирование закладочной смеси.

Прочность закладочного массива достигается за счет совершенствования состава твердеющей смеси и увеличения в ней вяжущих веществ. Однако это не всегда обеспечивает достижение поставленной цели. Значение дисперсности вяжущего материала и его влияние на формирование устойчивых структурных новообразований в закладочном массиве не нашло должного объяснения в научных работах.

Вопросами совершенствования составов и свойств твердеющей закладки на протяжении многих десятилетий занимались ученые Днепропетровского горного института, Научно-исследовательского горнорудного института, Криворожского горного института, Московского горного института, Ленинградского горного института, ГП «Укрпромтехнологии», Запорожского железорудного комбината. Обращалось внимание, прежде всего, на соотношения компонентов в закладочных смесях, использование материалов местной сырьевой базы и дешевизну закладочных работ. Вопросам формирования структурных внутренних образований в закладочном массиве в зависимости от удельной поверхности вяжущих веществ и рационального сочетания компонентов в технологии ведения горных работ уделено не достаточно внимания. Процессы измельчения закладочных материалов для полноты раскрытия связей между химическими элементами, представленными в закладочной смеси, требуют более глубокого изучения.

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

1. РАЗРАБОТКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ

1.1. ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ

Основные подтвержденные запасы (более 95 %) железных руд Украины сконцентрированы в пределах Криворожского железорудного бассейна и составляют 25,9 млрд т. В этих рудах окислы железа распределяются неравномерно от бедных до богатых. Среднее их содержание составляет 35 %, богатые руды содержат 58,3 % окислов железа с запасами 1,7 млрд т [1]. В Южно-Белозерском месторождении залегает богатая гематито-мартитовая руда, содержащая 52 – 67 % железа.

Системы разработки с твердеющей закладкой получили распространение при разработке мощных месторождений богатых руд, залегающих в сложных горно-геологических условиях. Применение систем разработки с твердеющей закладкой связано, прежде всего, с увеличением глубины разработки и ценностью добываемых руд. Решается целый ряд производственных задач, направленных на повышение эффективности и безопасности ведения горных работ, полноту извлечения запасов, сохранение земной поверхности под охраняемыми объектами и конкурентоспособности руды на отечественных и мировых рынках.

Основные особенности систем с твердеющей закладкой заключаются в формировании закладочного массива невысокой прочности 1 – 3 МПа, что определяется в большинстве случаев благоприятными горно-геологическими условиями, меньшими параметрами выемочных единиц и, как следствие, меньшим объемом закладочных работ.

Твердеющая закладка успешно применяется за рубежом – в Канаде, США, Японии, Швеции, Финляндии, Индии, Германии, Австралии при разработке полиметаллических, медных, железных и других руд [2 – 4]. Удельный вес систем разработок горизонтальными слоями с закладкой составляет 38,3, камерной с поэтажной отбойкой – 36,7, камерно-столбовой с закладкой – 10,9 % и т.д.

В настоящее время системами с твердеющей закладкой в странах СНГ добывается 25 % руд цветных и ценных металлов, в Австралии – 30, в Канаде – 40, в Финляндии – 85, во Франции – 87 [2]. Это свидетельствует об эффективности применения этих систем разработки, несмотря на дополнительные расходы, которые перекрываются качеством полученной продукции и отсутствием затрат на обогащение.

Риддер-Сокольный рудник отрабатывает Риддерскую залежь богатых полиметаллических руд мощностью 2 – 18 м при угле падения 50 – 60°. Залегание руд неравномерное, ближе к сбросу рудное тело разбито на

блоки различной мощности, которые сильно смещены относительно друг друга. Вмещающие породы сравнительно устойчивы за исключением прослоев серицито-кварцевых пород лежачего бока, зон дробления и нарушений. Система разработки камерная с доставкой руды силой взрыва (при мощности 10 – 18 м) и с мелкошпуровой отбойкой (при мощности 2 – 10 м).

Рудник «Северный» разрабатывает медно-никелевую пластообразную залежь с углом падения $35 - 55^\circ$ и мощностью 0,2 – 40 м, в среднем – 6 м. Руды брекчиевые и вкрапленные, средней устойчивости, коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова $f = 8 - 12$. Применяют системы разработки с твердеющей закладкой, подэтажную отбойку руды с ее магазинированием. Глубина горных работ составляет 350 м. Этаж высотой 60 м делят на блоки и обрабатывают первичными и вторичными камерами длиной по простиранию до 40 м. Производительность породно-закладочного комплекса 150 тыс. м³/год.

Шахта «Магнетитовая» разрабатывает Высокогорское месторождение сернистых магнетитовых руд. Рудные залежи мощностью от 8 до 30 м, между которыми залегают туфы, роговики, безрудные скарны мощностью 15 – 40 м. Коэффициент крепости руды $f = 10 - 13$, пород – $f = 10 - 16$, угол падения рудного тела $60 - 75^\circ$ [5]. В результате применения систем с твердеющей закладкой удалось полностью избежать деформации массива и земной поверхности.

Орловское полиметаллическое месторождение представлено рудными телами мощностью 10 – 80 м (в среднем 30 – 40 м), залегающими на глубине от 100 до 700 м с углом падения от 10 до 70° (в основном $40 - 47$) [6]. Все они характеризуются сложной морфологией и выходят под обводненные песчано-глинистые отложения с мощностью от 20 до 130 м.

Орловский рудник осуществляет выемку руды слоевой системой разработки с твердеющей закладкой. Потери руды в среднем составляют 4,8 %, разубоживание – 6,7 %.

Опыт разработки Талнахско-Октябрьского рудного узла в сложных горно-геологических условиях с применением систем разработки с твердеющей закладкой свидетельствует о ее высокой эффективности. Рудная залежь Октябрьского месторождения мощностью около 30 м и протяженностью с севера на юг порядка 1 км имеет восточное падение с углом 18° . Рудное тело образовано тектоническими блоками шириной 10 – 80 м и длиной 60 – 200 м. Блоки ограничены крутопадающими (около 80°) нарушениями с амплитудой смещения до 10 м. Горные работы ведутся на глубине 700 – 900 м.

В Украине твердеющую закладку применяют при разработке Южно-Белозерского месторождения железных руд в Запорожской области и урановых руд Ватутинского и Новокозачинского месторождений в Кировоградской области. До середины 90-х годов в Кривбассе твердеющую закладку применяли на нескольких рудниках.

Государственное предприятие «ВостГОК» имеет в своем составе две шахты «Смолинскую» и «Ингульскую». Угол падения рудных залежей 60 – 70°. Вмещающие породы залежи обладают прочностью 120 – 180 МПа. Основным породообразующим минералом всех видов альбититов является альбит, который составляет 60 – 80 % вмещающей породы. Отработка запасов руды на шахте производится с помощью этажно-камерной системы с твердеющей закладкой. Высота этажа в условиях шахты «Смолинская» – 60 – 90 м, «Ингульская» – 70 м [7]. При размерах камер 70 – 100 м закладочный массив должен обладать устойчивым вертикальным обнажением, быть вязким и достаточно прочным для предотвращения разрушения при взрывной отбойке.

На рудниках «Коминтерна» и им. Ильича верхние отработанные этажи были заложены твердеющей закладкой следующего состава (кг/м³): шлак – 400, песок – 1200, вода – 450 л. Прочность закладочного массива составляет порядка 4 – 5 МПа. По экономическим причинам шахты отказались от применения твердеющей закладки. Однако до сих пор возврат к системам с твердеющей закладкой следует считать актуальным вопросом. В Кривбассе достаточно накоплено запасов шлаков и хвостов обогащения, которые успешно могут быть применены для приготовления твердеющей закладки.

Из анализа следует, что системы разработки с твердеющей закладкой эффективно применяются при разработке крутопадающих залежей с высоким содержанием ценного компонента, при неустойчивых породах всяческого бока и средней устойчивости руды.

1.2. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ НА РУДНИКАХ

Применение твердеющей закладки обеспечивает полноту выемки руды при минимальных потерях и безопасность ведения горных работ, снижая 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. Чтобы снизить стоимость закладочных работ в твердеющую закладку добавляют дробленую породу от проведения горных выработок и производится постоянный поиск альтернативных материалов.

При разработки рудных месторождений подземным способом наиболее часто применяется нисходящий порядок ведения горных работ. В этом случае искусственные целики испытывают давление призмы сползания, доходящей до поверхности, которая увеличивается с понижением горных

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

работ, что предопределяет необходимость увеличения размеров искусственных целиков и их прочность [8].

Глубина ведения горных работ является главным критерием, регламентирующим прочность закладочного массива из твердеющих смесей. Анализ крупнейших отечественных рудников по добыче руд черных и цветных металлов подземным способом системами разработки с твердеющей закладкой позволил выявить закономерную тенденцию изменения прочности твердеющей закладки в зависимости от глубины разработки месторождений (рис.1).

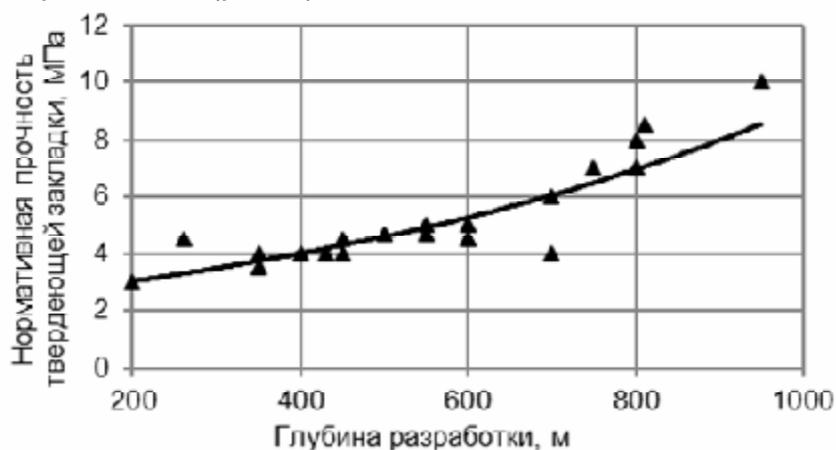


Рис. 1.1. Тенденция изменения прочности твердеющей закладки в зависимости от глубины разработки

Из графика на рис. 1.1 следует, что глубина разработки существенно влияет на прочностную характеристику твердеющей закладки, изменяя ее в интервале 200 – 900 м в 2,5 – 3 раза. Следовательно, вопрос повышения прочности закладки в условиях возрастающих глубин разработки, особенно месторождений со сложными горно-геологическими условиями, опасных по горным ударам, с позиции безопасности ведения горных работ заслуживает особого внимания. На глубинах разработки свыше 600 м расход вяжущих компонентов составляет 300 кг/м³ и более. Сложившаяся ситуация требует выбора экономичных путей повышения прочности закладочного массива.

В зарубежной практике разработки месторождений с закладкой в качестве вяжущего материала приоритет отдается цементам, в отечественной – металлургическим шлакам. Считается, что более целесообразно использовать простой и дешевый поверхностный закладочный комплекс при незначительном расходе вяжущего (цемента) в сравнении с использованием шлака, так как их транспортировка от металлургических заводов до рудника и подготовка (размол) дороже стоимости эквивалентного количества цемента [9]. Однако при больших производственных мощностях рудников и соответственно значительных объемах закладочных работ использование цемента в качестве основного вяжущего экономически нецелесообразно.

С 1989 по 1999 г. на шахтах им. Ленина и «Гвардейская» (Кривбасс) разубоживание руды при этажных и подэтажных системах с обрушением

вмещающих пород в среднем составили соответственно 11,4 и 12,9 % [10]. Если сравнить с Запорожским железорудным комбинатом (ЗЖРК), единственным горнорудным предприятием Украины, имеющим большой опыт применения этажных систем разработки с твердеющей закладкой, этот показатель составляет порядка 3 – 5 %.

Эффективность применения систем разработки с твердеющей закладкой подтверждается на горно-обогатительном комбинате «Химрудтех». Достигнута высокая производительность труда, снижены потери полезного ископаемого с 30 до 4,4 %. Разубоживание руды уменьшилось на 3 – 4 %, а объем ее добычи руды из целиков возрос до 50 – 60 % по сравнению с 5 – 10 % при системах разработки с обрушением боковых пород [11].

Устойчивость обнажений при системах с твердеющей закладкой в 1,5 – 2 раза выше, чем при системах с обрушением налегающих пород. Заполнение очистного пространства твердеющей закладкой позволяет в 2 – 2,5 раза уменьшить интенсивность проявления горного давления, сохранить, а в ряде случаев и увеличить размеры камер, а размеры рудных целиков уменьшить с глубиной [12].

При использовании систем разработки с твердеющей закладкой значительная доля затрат (до 15 – 25 %) в добыче руды приходится на закладочные работы [13]. Однако повышение безопасности работ и снижение затрат физического труда на поддержание выработанного пространства оправдывают повышенную себестоимость добываемой руды [14].

По данным расчетов, выполненных на шахте «Эксплуатационная» ЗЖРК при глубине 500 – 700 м, себестоимость 1 т добытой руды повышается на 3,6 – 4 % на каждые 100 м понижения горных работ и этот показатель может быть увеличен в 2 – 3 раза [15].

При неустойчивых рудах и вмещающих породах необходимо повышать прочность закладочного массива до 10 – 15 МПа. При высоте искусственного массива до 60 м прочность может не превышать 3 МПа, свыше – 6 МПа и более [16, 17]. Основным фактором, определяющим прочность закладки, является глубина ведения горных работ, где горное давление проявляется наиболее интенсивно.

1.3. СОСТАВЫ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ

Главными критериями выбора состава твердеющей закладки являются технологичность (прочность, транспортабельные свойства) и экономичность (стоимость компонентов закладки, транспортные затраты). Опыт производства закладочных работ свидетельствует о прямо пропорциональной зависимости увеличения прочности закладочного массива от расхода вяжущего вещества.

Исследованиям составов твердеющей закладки и технологии ведения закладочных работ посвятили свои труды выдающиеся ученые:

М.Н. Цыгалов, М.И. Агошков, О.Н. Байконуров, Р.М. Бронников, В.В. Куликов, К.В. Мясников, Э.О. Штернбек, В.П. Кравченко, А.М. Кузьменко, З.Р. Маланчук, В.Г. Перепелица, С.А. Курносков, К.Ю. Репп, Н.Ф. Замесов, А.Л. Требуков, В.П. Волощенко, В.И. Ляшенко, Е.П. Чистяков, П.В. Швыдько и др.

В результате исследований учеными сделан большой вклад в повышение эффективности разработки рудных месторождений при системами разработки с закладкой, которые заключались в полноте извлечения запасов, а также в разработке бесцементных закладочных смесей из местных материалов, что поспособствовало снижению себестоимости закладочных работ.

Значительные запасы шлаков черной и цветной металлургии, накопившиеся в отвалах и отравляющие окружающую среду, нашли применение в составах закладочных смесей многих рудников в качестве вяжущих материалов. Это позволило сократить расход дорогостоящего портландцемента или вообще отказаться от его применения, а также утилизировать отходы производства в подземном пространстве.

На Риддер-Сокольном руднике отработанные камеры закладывают твердеющими закладочными смесями марки М25, в составе которых (кг/м³): цемент – 140, хвосты текущего обогащения – 1195 и вода – 510. Годовой объем закладки составляет 280 тыс. м³. Цемент с хвостами обогащения обычно не образует прочных закладочных массивов, и поэтому применяют химические добавки. Для этих условий наиболее подходящей является добавка *Pozzolith MR 55* (на основе *Pozzolith MR 25* с воздухововлекающими добавками) [18]. Авторы работы уделяют внимание эффективности применения добавки и не рассматривают прочностные связи компонентов закладочной смеси, ее фракционный состав хвостов обогащения и размер частиц, что особенно важно при рассмотрении механизма образования искусственного камня.

На руднике «Северный» состав твердеющей закладки принят следующим (кг/м³): цемент М-300 – 165, местный песок – 1180 и вода – 400. Объемная масса закладки – 2,4 т/м³. Прочность на одноосное сжатие 1,5 – 1,9 МПа [19]. В дальнейшем в качестве заполнителя стали применять переделки никелевой руды и воздухововлекающую добавку. При бутобетонной закладке в качестве наполнителя используют крупнокусковую породу от проходки выработок. Объем всех заполняемых камер бутобетоном составляет 80 %. Прочность массива изменялась от 1 до 7 МПа, наблюдалась его слоистость. Вертикальные обнажения площадью до 800 м² были устойчивы.

Недостатки состава закладки – применение дорогостоящего цемента, формирование закладочного массива невысокой прочности, большое количество кремнезема. В данном случае практически не рассматривается вопрос повышения прочности и взаимодействия химических элементов, а наличие в песке окислов кремния не способствует повышению несущей способности. Этим вопросам уделено недостаточно внимания при полном

научном объяснении протекания процесса образования закладочного массива.

На шахте «Магнетитовая» проводились исследования возможности отработки охранных целиков системой с применением твердеющей закладки. Значительная часть запасов – около 40 % гор. 210 – 600 м попадала в охранный целик. Для закладки камер при отработке целика руды на гор. 210, 290, 370 и 450 м был принят следующий состав твердеющей закладки (кг/м³): портландцемент М-300 40 – 65, граншлак НТМК – 340 – 360, известняк – 600, хвосты МОФ – 600. В зависимости от глубины отработки целика установлена нормативная прочность 3 – 6 МПа. После отработки гор. 210 м камерной системой разработки с твердеющей закладкой были проведены натурные наблюдения по состоянию искусственного массива, которые дали положительные результаты.

В закладочной смеси в качестве микронаполнителя использовался известняк с высоким содержанием СаО, прочность которой имеет невысокие показатели при данном компонентном составе. Это обусловило многокомпонентность закладочной смеси и появление неустойчивых химических связей при взаимодействии с водой. Однако здесь не рассматривается взаимодействие химических соединений, содержащихся в доменном шлаке, что представляет научный интерес в получении устойчивых прочностных связей.

При разработке Орловского полиметаллического месторождения применялся следующий состав закладки (кг/м³): цемент – 250, хвосты – 1290, измельченная порода – 220, вода – 520. Добыча руды происходит под искусственной кровлей нормативной прочностью 4 МПа в возрасте 3 месяцев. Двухслойная конструкция кровли (1 слой – 4 МПа, 2 слой – 2 МПа) определяет неоднородность свойств закладочного массива. Глубина горных работ 700 м. Недостатки принятого состава: хвосты обогащения могут содержать фенолы и другие органические соединения, что негативно сказывается на прочности закладки. Состав содержит дорогостоящий цемент.

В работе [20] приведены результаты научно-исследовательских работ по созданию составов твердеющих смесей на основе местных ангидрита, шлака никелевого производства и щебня базальтовых пород при разработке Октябрьского месторождения Талнахско-Октябрьского рудного узла. Добавка цемента до 10 % используется в качестве активизатора. Закладочная смесь, изготовленная на основе ангидрита, обладала высокой прочностью – до 20 МПа. Адгезия данного состава в значительной степени зависит от вида заполнителя. Заполнителем являлся крупнодробленый ангидрит, что придает смеси однородность по составу. При замене заполнителя на туфы наблюдалось снижение прочности в 3 – 5 раз. В качестве недостатка предложенного состава авторы отмечают тот факт, что ангидрит наиболее эффективно взаимодействует только с ангидритовым заполнителем. При использовании других материалов прочность закладки снижается.

Исследованиям составов твердеющей закладки Яковлевского рудника (КМА) посвящена работа [21]. Требования к качеству закладочного массива на руднике повышены, так как в кровле рудного массива залегают известняки карбона, включающие глинистые прослои, снижающие ее устойчивость. При расчете минимальной нормативной прочности главным критерием является быстрый переход закладочной смеси в объемное напряженное состояние, в результате чего обеспечивается эффективное применение системы разработки и порядок отработки блока.

Минимальная нормативная прочность составляет 2 – 3,5 МПа, с запасом – 4 МПа. Принят состав следующего вида (кг/м³): цемент – 50, электросталеплавильный шлак – 450, песок кварцевый – 1250, вода – 380 – 400. Нормативная прочность монолитного массива составляет 4 – 5,5 МПа. Состав должен обеспечивать устойчивые обнажения закладочного массива. Недостатком данного состава является высокое содержание SiO₂, которое способствует разубоживанию руды закладкой, а также низкая активность сталеплавильных шлаков.

Значительный опыт разработки месторождений медно-колчеданных руд с применением твердеющей закладки имеет подземный рудник Гайского ГОКа [22]. Отработка месторождения ведется этажно-камерной системой с последующим заполнением выработанного пространства твердеющей смесью. Ширина камер и целиков принята 15 м. Состав закладки следующий (кг/м³): цемент – 40, молотый шлак – 360, песок – 1260, вода – 360 – 400. Прочность закладки составляет 5 – 6 МПа. Разубоживание от попадания закладки – 2,8 – 3 %. Авторами работы выявлен тот факт, что уменьшение прочности закладки до 2,5 – 3 МПа, связанное с пониженным расходом активизатора цемента до 30 кг/м³, приводит к увеличению разубоживания до 6 – 7 %. Снижение показателя разубоживания руды дает значительный экономический эффект. Несмотря на его низкий показатель, наличие цемента в составе закладки всегда будет приводить к удорожанию производства закладочных работ. Отмечается также высокое содержание песка в составе закладки.

На Красногвардейском руднике также применяют этажно-камерную систему с твердеющей закладкой. Рудное тело по простиранию разбивают на блоки по 25 м, каждый из которых делят на выемочные камеры первой, второй и третьей очереди. Ширина камер первой и второй очередей 8 м, третьей – 9 м. При отработке камер между ними оставляется рудный или искусственный целик не менее 16 м. Состав твердеющей закладки (кг/м³): цемент – 90, молотый шлак – 1200, вода – 450. Через три месяца закладка набирает прочность 3 – 4 МПа. Разубоживание составляет 6 % [23]. Недостатком данного состава является высокий расход вяжущих материалов при сравнительно невысокой прочности закладки, а также значительные затраты на измельчение шлака.

На рудниках Норильского комбината используют камерно-целиковую и слоевую систему разработки. В результате проведенных научно-исследовательских работ рекомендован состав твердеющей закладки

(кг/м³): вяжущий материал – 600, в том числе цемент М300 – 100 – 120, ангидрит молотый – 180 – 220, гранулированный шлак рудно-термических печей никелевого завода – 280 – 320, заполнитель – 1380 – 1400, в том числе искусственный песок крупностью 0 – 5 мм – 800, щебень крупностью 5 – 30 мм – 600 [24].

Прочность образцов закладки в возрасте 1 месяц составляет 2 – 4,5 МПа, в зависимости от соотношения материалов. Как видно, твердеющую закладку составляет сложное комбинированное вяжущее, состоящее из 3 различных материалов. Такого рода составы сложны в приготовлении, к ним применяются повышенные требования. При данном соотношении компонентов достигается низкая прочность твердеющей закладки. Измельченный ангидрит, вступая в реакцию с водой, образует двуводный гипс, который, как известно по опыту строительной промышленности ведет к ускорению схватывания смеси, что затрудняет ее транспортировку на большие расстояния.

В настоящее время ведутся исследования по совершенствованию закладочных работ с использованием хвостов обогащения медистых руд. Исследуется состав закладочной смеси, состоящий из системы «шлак – хвосты – цемент».

На Джезказганских [25] рудниках для добычи руд применяют систему разработки с твердеющей закладкой. Отсутствие в местной сырьевой базе металлургических шлаков для приготовления твердеющей закладки привело к необходимости исследования хвостов обогащения. Отвальные золы местных ТЭЦ можно использовать в качестве микрозаполнителя или минеральной добавки к основному вяжущему – портландцементу, приводящие к снижению части его расхода.

Исследованиями установлено, что вяжущим материалом может служить цемент в комбинации с измельченной золой или хвостами обогащения. Оптимальное соотношение вяжущего и заполнителя составляет 1:3,5 и 1:4,5 в зависимости от вида вяжущего и заполнителя. Расход материалов на состав закладки принят следующий (кг/м³): отвальные хвосты обогащения – 300 кг, портландцемент М400 – 120, зола ТЭЦ – 280, дробленая отвальная порода – 1100, вода – 400. Прочность образцов со сложным заполнителем составляет 4 – 8 МПа. Недостатком состава является наличие в нем дорогостоящего портландцемента и многообразие применяемых компонентов, что требует увеличения числа механизмов на закладочном комплексе.

На рудниках Восточного Казахстана удалось снизить нормативную прочность закладки с 8 до 3,95 МПа. Это возможно, прежде всего, когда месторождение залегает в благоприятных горно-геологических условиях и высота обнажения закладочного массива составляет 30 – 50 м. В сложных гидрогеологических условиях снижать прочность закладки не рекомендуется.

Большой опыт применения хвостов обогащения цветных металлов в составе твердеющей закладки имеет Польша [26]. Легницко-Глоговский

медный округ (ЛГМО) разрабатывает месторождение медных руд. В качестве вяжущего вещества применяют цемент, гипс, известь, доменный шлак, золу электростанций. По техническим и экономическим соображениям наиболее эффективными составами считаются № 1 и 2 со следующими компонентами (%): хвосты – 80,68 и 73,09; вода, цемент – 5,64 и 13,3; известь – 4,56 (только у состава № 1); песок – 9,12 и 13,61. В некоторых составах в качестве пластификатора используют хлористый кальций для улучшения реологических свойств закладочной смеси при транспортировании.

Прочность твердеющей закладки составляет 0,4 – 2,6 МПа. Это обусловлено, вероятно, благоприятными горно-геологическими условиями. Недостатком таких составов является невысокая прочность закладки и нецелесообразность применения ее в сложных горно-геологических условиях.

Нефтетитановое месторождение Ярегского горно-химического комплекса запланировали обрабатывать системой разработки с применением твердеющей смеси [27]. В качестве вяжущего исследовался цемент и доменный гранулированный шлак металлургического завода, заполнителем служили хвосты обогащения, песок, щебень. Состав закладки с использованием песка (кг/м^3): цемент – 30 – 200, шлак – 200 – 370, песок – 1200, вода – 400. При данном составе закладочной смеси в возрасте 90 суток прочность закладки составляет 1,7 – 7,0 МПа. Применение хвостов обогащения в качестве заполнителя снижает прочность до 1,5 – 6,1 МПа. Добавление к хвостам обогащения щебня (хвосты – 900 кг, щебень – 300 кг, вода – 400 л) не оказывает существенного влияния на прочность закладки, которая находится в пределах 1,5 – 6,3 МПа. Использование песка и щебня (песок – 935 кг, щебень – 300 кг, вода – 400 л) увеличивает прочность до 1,8 – 7,25 МПа, однако при этом отмечается высокий расход вяжущего материала при значительном содержании SiO_2 в закладочной смеси, что отрицательно влияет на качество руды при ее разубоживании закладочным материалом.

Якутнипроалмазом разработаны бесклинкерные закладочные смеси для использования на алмазных рудниках. В состав смесей входят обожженные карбонатные породы и туфы. Особенностью является то, что компоненты закладки затворяются не водой, а слабым раствором флегматизатора. Несмотря на то, что нормативная прочность закладки варьируется в пределах 0,5 – 13 МПа, у составов закладки есть существенные недостатки. Через 12 ч после затворения температура закладочного массива достигает 52°C в центре закладочного массива [28]. Мгновенный экзотермический эффект закладки разогревает вентиляционную струю, ухудшает условия работы и вызывает температурные напряжения пород вмещающего массива.

На Малеевском руднике для обработки рудных тел применяется сплошная многоступенчатая выемка руды в восходящем порядке с закладкой выработанного пространства. Камеры первой очереди шириной

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

20 м, длиной по мощности рудного тела и высотой 70 м обрабатывают этажно-камерной системой с твердеющей закладкой прочностью 4 МПа. Камеры второй, третьей, четвертой очередей обрабатывают подэтажно-камерной системой разработки с закладкой прочностью 2,5 – 3,0 МПа. Состав закладки (кг/м³): цемент – 70, доменный шлак – 280, инертный заполнитель с добавлением пород – 1125 [29]. Недостаток состава заключается в содержании цемента, низкой плотности закладочного массива.

В условиях государственного предприятия «ВостГОК» для снижения себестоимости в закладочную смесь добавляют дробленые горные породы крупностью до 15 мм. Компонентный состав закладочной смеси (кг/м³): шлак – 200 – 300; песок – 650 – 750; порода дробленая 750; вода шахтная – 300 – 400. Нормативную прочность 3 – 5 МПа закладка набирает через 6 месяцев [30]. Недостатком состава является большое количество абразивной породы, затрудняющей транспортирование смеси, и высокое содержание кремния в общей массе компонентов.

Компонентные составы твердеющей закладки рассмотренных подземных рудников приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**КОМПОНЕНТНЫЕ СОСТАВЫ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СНГ**

Наименование рудника	Состав твердеющей закладки, кг/м ³		Прочность закладки, МПа
	Вяжущий материал	Инертный наполнитель	
Запорожский железорудный комбинат	Доменный граншлак – 450	Порода – 500 Отходы флюса – 1050	6 – 7
Риддер–Соколовый рудник	Цемент – 140	Хвосты обогащения – 1195	4 – 5
Гайский рудник	Цемент – 40, Молотый шлак – 360	Песок – 1260, Примесь глины 30 %	5 – 6
Яковлевский рудник	Цемент – 50, Сталеплавильный шлак – 450	Кварцевый песок – 1250	4,5 – 5
Норильский ГМК	Цемент – 100 – 120, Ангидрит молотый – 180–220, Граншлак никелевого завода – 280 – 320	Песок – 800, Щебень – 600	2 – 4,5
Урановые рудники ГП "ВостГОК"	Граншлак – 200 – 300	Карьерный песок – 1200	3 – 5
Горно–обогатительный комбинат Химрудтех	Доменный граншлак – 400	Песок – 1200	6 – 7
Малеевский рудник	Цемент – 70, Доменный шлак – 280	Порода – 1125	4
Североуральский бокситовый рудник	Шлак – 360, известь – 190	Песок – 1400	5 – 6
Ярегский горно–химический комплекс	Цемент – 30 – 200, Шлак – 200 – 370	Песок (хвосты обогащения) – 1200	1,7 – 7

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Продолжение табл. 1.1

Джезказганские рудники	Портландцемент М 400 – 120, Зола ТЭЦ – 280	Порода – 1100, Отвальные хвосты обогащения – 300	4 – 8
Красногвардейский рудник	Цемент – 90, Молотый шлак – 1200	–	3 – 4
Орловский рудник	Цемент – 250	Хвосты – 1290, Порода – 220	4
Шахта «Магнетитовая»	Цемент – 40 – 65, Граншлак – 360	Известняк – 600, Хвосты – 600.	3 – 6
Рудник «Северный»	Цемент – 165	Местный песок – 1180	1,5 – 1,9

Для приготовления вяжущих материалов закладочной смеси в поверхностных закладочных комплексах используют шаровые, трубные мельницы, которые измельчают в основном шлаки и ангидриты. В отечественной практике тонкость измельчения вяжущих составляет 50 – 70 % частиц крупностью - 0,074 мм [31]. При этом расход вяжущего материала в 1 м³ закладки может достигать 500 кг. К нему обычно добавляют активизаторы (известь, гипс), что повышает затраты на закладочные работы. Прочность формируемых искусственных массивов на рудниках с приведенной тонкостью измельчения составляет 2 – 10 МПа, или в среднем 6 МПа. Это является недостаточным для безопасной и эффективной отработки рудных запасов при переходе на глубокие горизонты в сложных горно-геологических условиях.

В зарубежной практике основными компонентами твердеющей закладки служат цемент и хвосты обогащения. Соотношение вяжущего и заполнителя в закладочной смеси может достигать в некоторых случаях 1:20 – 1:30. При создании прочных искусственных слоев закладки для передвижения самоходной техники соотношение вяжущего и заполнителя изменяют до 1:7. Низкие требования к составу твердеющей закладки на зарубежных рудниках делают достаточно выгодным ее использование. В этих условиях широкое применение получила пастовая закладка, которая состоит из мелких фракций вяжущего и заполнителя приблизительно одной крупности. Такие смеси применяют при небольшом расстоянии транспортирования к выработанному пространству. Причиной этого является достаточно высокая густота смеси, что приводит к увеличению напряжения сдвига смеси. Одновременно с этим массив получается однородным по прочности и структуре.

Например, пастовая закладка применяется на рудниках Грин Крик (Аляска, США) компании Инко, на руднике Бад Бляйбург (Австралия) и др. [32]. Так, на руднике Гарпенберг (Финляндия) заполнение выработанного пространства производят пастовой закладкой. Компонентами являются хвосты обогащения 80 % частиц класса 130 мкм, 20 % частиц – 20 мкм, 5 – 10 % составляет добавка цемента. Получают прочность в возрасте 30 дней 1 МПа. Состав закладки обладает низкой прочностью, недостаточной для применения при системах с большими параметрами камер.

Анализ составов твердеющей закладки зарубежных и отечественных рудников показал, что наиболее часто используют в качестве вяжущих материалов – цемент, шлак, пирротин, хвосты обогащения. Из инертных заполнителей распространены хвосты обогащения, песок, отвальная горная порода, щебень, гравий, известняк, шлак и др. (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Диаграмма использования вяжущих (а) и инертных материалов (б) в закладочных работах (%)

Из диаграммы рис. 1.2 следует, что в практике закладочных работ приоритетным вяжущим материалом служит цемент.

Целесообразной следует считать попутную добычу вяжущего материала при производстве закладочных работ на горном предприятии, что значительно сокращает затраты на приобретение материала. Так, фирма «Lafarge» является производителем гипсовых вяжущих и владельцем Артемовского гипсового рудника, которому планируется поставлять вяжущий компонент [33].

1.4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ НА ЕЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Химический состав компонентов закладочной смеси формирует основу прочности искусственного массива. Известно, что форма, размер и состав химических связей определяют прочность массива, а его разрушение происходит по наиболее слабым химическим связям вяжущего камня с инертным заполнителем.

При значительной вариации применяемых составов закладочных смесей в горнорудной промышленности не достаточно внимания уделено изучению химических процессов образования структурных связей и не выявлены факторы, влияющие на формирование монолитного камня. Указанные факторы в значительной степени определяют прочность и устойчивость искусственного массива.

В работе [34] приведены результаты исследования, в которых изучалась структура ряда составов закладочных смесей на основе хвостов обогащения сульфидных руд с добавками цемента и извести. Продукты гидратации в

искусственном камне при добавке цемента, извести и серной кислоты имели связи гидросиликатов кальция, гипса, этрингита. Прочность твердеющей закладки составила 9,1 – 9,9 МПа. В исследованиях не уделено внимание форме, размеру, химическому составу кристаллических новообразований в этих условиях и при участии других вяжущих веществ.

С целью повышения прочности искусственного камня твердеющей закладки, состоящей из хвостов, шлака, цемента, использована полимерная добавка класса полигексаметиленгуанидинов [35]. Установлено появление игольчато-волокнистых гидросиликатных связей в присутствии добавки. Без нее связи являются игольчато-призматическими. Однако в такого рода составах скорость схватывания смеси достаточно высока (до 1 – 8 ч), что связано с присутствием большой доли мелкодисперсных частиц в хвостах обогащения. Но в работе не дана оценка степени влияния установленных химических связей на прочность закладки.

Для установления эффективности применения в закладочной смеси конвертерных шлаков составы готовились с добавлением хвостов обогащения [36]. Составы шлак, песок и хвосты показали недостаточную прочность 0,2 – 0,3 МПа, что связано с отсутствием прочных гидросиликатных связей из-за низкого содержания кремнезема. Составы типа «цемент – хвосты» показали прочность 3,9 – 5,6 МПа, однако через 90 дней прочность снизилась. В искусственном камне обнаружены кристаллы гипса, гидросульфоалюмината, гидросульфоферрит кальция, гидроксид и карбонат кальция, продукты окисления пирита и новые соединения на его основе. Влияние формы и химсостава связей, исходного минерального состава компонентов и структурных новообразований искусственного камня на его прочность в работе не раскрыто и лишено научного обоснования. В данном случае рассматривалась структура состава «шлак – хвосты», но не исследовали состав «шлак – известняк – порода», что существенно отличается по качеству получения закладочного массива.

В работах [37, 38] исследовалась возможность приготовления закладочной смеси, состоящей из галитовых отходов, магнезиального цемента и добавки лигносульфата, а также изучалось взаимодействие между компонентами закладки. В результате исследования обнаружено формирование игольчатого каркаса из гидрооксихлоридов магния и амебовидных формирований брусита $Mg(OH)_2$. Составы характеризуются невысокой прочностью – 2 МПа. Однако, несмотря на высокую связывающую способность магнезиального цемента, при взаимодействии с водой образуется брусит $Mg(OH)_2$, который имеет свойство увеличиваться в объеме, что часто приводит к появлению внутренних напряжений и образованию трещин.

В работе [39] приведены результаты исследования напряженного состояния закладочного массива и описано его поведение при различных свойствах твердеющей смеси (ангидрито-шлако-цементных составов М20, М40, М80). Представленные составы характеризуются различным модулем упругости. Установлено, что с увеличением модуля упругости напряжения

снижаются. Однако в работе не рассмотрены структурные особенности твердеющей закладки и не известно, за счет какого фактора возрастает модуль упругости.

Поиск группой авторов рационального состава закладочной смеси для Учалинского ГОКа привел к использованию негашеной извести в качестве активатора вяжущих свойств доменного шлака. Заполнителями в составе служат диабаз крупностью 0 – 5 мм и хвосты обогащения, добавляют также пластификатор ЛСТ. В результате лабораторных и промышленных исследований получена прочность 3 – 5 МПа. Авторы сделали вывод, что замена цемента для активизации свойств молотого доменного шлака возможна полностью или частично [40]. В работе не раскрыто значение минерального состава извести и шлаков и не определено влияние извести на структурные новообразования закладки, что объясняет причину замены цемента.

Попытки получения бесцементных закладочных смесей рассматривались в работе [41]. Для этого доменный гранулированный шлак измельчали до 70 – 90 % частиц крупностью -0,074 мм, добавляли хвосты обогащения и суперпластификатор СП-1. Несмотря на повышение удельной поверхности шлака, достигнуты невысокие показатели прочности закладки 3,6 – 7,0 МПа в возрасте 90 дней. Не изучены взаимодействие минералов шлака и хвостов обогащения, а также состав кристаллических новообразований, что представляет научный интерес, так как высокое содержание серы в хвостах может привести к сульфидной коррозии и разрушению внутренних химических связей монолитного массива.

С целью возможности использования гидравлической закладки на основе хвостов обогащения на Жезказганском месторождении проведено исследование минерального состава [42]. По предположению авторов, при использовании гидравлической закладки минералы из твердофазных оксидов хвостов обогащения *Si*, *Al*, *Mg*, *Ca* могут вступать между собой в реакцию, образуя вторичные соединения. Однокальциевый силикат обладает собственными вяжущими свойствами и на протяжении 2 – 3 лет способен создавать прочный монолитный массив.

В работе [18] приведены результаты исследования состава твердеющей закладки на основе цемента, флотационных хвостов обогащения и пластификатора *Pozzolith MR* для Риддер-Сокольного рудника. Пластификатор использовался для улучшения реологических свойств закладочной смеси и не влиял на прочность закладки 4,5 МПа. Петрографические исследования показали различия в структурных особенностях закладки. Произошло изменение округлых форм кристаллов на волокнистые формы. В приведенных исследованиях авторы не рассматривали тип и химический состав кристаллических новообразований волокнистой формы, что влияет на прочностные характеристики закладки.

Выполнялись исследования возможности применения доменных шлаков в составе твердеющей закладки на рудниках «Оутокумпу» (Финляндия). Минералогические исследования показали, что основными составляющими

шлаков являлись силикаты кальция мервинит и мелилит [43]. Испытывались составы «шлак – известь – хвосты обогащения» и «цемент – хвосты обогащения». Прочность составов «цемент – хвосты обогащения» достигала 2 МПа, на основе шлака 4 – 5 МПа. Было решено отказаться от цемента в связи с появлением в структуре закладки этtringита на поверхности зерен пирита, что явилось причиной сернистой коррозии. Кристаллические связи со временем разрушались. В приведенных исследованиях рассматривались новообразования на основе цемента, но не рассматривалась кристаллическая структура образцов закладки на основе шлакового вяжущего, не установлен вид и свойства кристаллических образований состава «шлак – известь – хвосты обогащения».

В приведенных работах, исследования, где рассматривались структурные особенности в закладке, посвящены хвостам обогащения. Однако не достаточно внимания уделено вопросам формирования структурных образований закладки при других компонентах в составе смеси. Отсутствие научно обоснованных структурных образований и их значение при создании смесей для твердеющей закладки заставляет искать пути по применению дешевых местных материалов, которые не всегда обеспечивают необходимую прочность закладочного массива.

Анализ информационных источников показал, что при исследовании искусственного камня из твердеющей закладки рассматривается либо форма и размер кристаллических новообразований затвердевшего массива, либо минеральный и химический составы исходных компонентов. Однако приведенные аспекты не учитываются в совокупности для обоснования и способствования повышения прочности закладочных массивов рудников. Отсутствуют работы, где приводились результаты исследования структуры и свойства твердеющей закладки вида «шлак – известняк – порода».

Исследованию структурных особенностей закладочного массива на основе металлургических шлаков, золошлаков, сухой золы, цеолитов, известняков, различных видов горных пород уделено недостаточно внимания. Не изучено время формирования новообразований, которое оказывает влияние на динамику набора прочности и интенсификацию ведения горных работ.

Форма и состав кристаллов новообразований в твердеющей системе влияют на свойства искусственного камня. В составе твердеющей закладки приоритетными являются материалы с высоким содержанием CaO .

Следовательно, образуются связи гидросиликатов кальция (ГСК) различного состава и прочности. Прочность нитевидных гидросиликатов кальция на растяжение с основностью CaO/SiO_2 меньшей чем 1,5 достигает 1350 МПа, а высокоосновных ($CaO/SiO_2 > 1,5$) – 770 МПа. Различие в показателях прочности объясняется тем, что низкоосновные ГСК образуют нитевидно-волокнистые кристаллы, а высокоосновные – пластинчато-призматические [44]. При этом отмечается, что в составе низкоосновных гидросиликатов кальция преобладают анионы с высокой степенью конденсации (полимеризации) с преимущественно ковалентными связями,

что предопределяет повышенные их связующие свойства [45]. Высокоосновные гидросиликаты содержат в основном относительно слабые Са-О ионные связи, которые не в состоянии полностью компенсировать убыль из системы ковалентных связей. Авторы не рассматривают влияние удельной поверхности частиц вяжущего вещества на структуру, состав и прочность закладки, что представляет научный интерес для разработки составов повышенной прочности.

Таким образом, повышение прочности закладочного массива происходит, когда отношение CaO/SiO_2 в структурных химических образованиях стремится к 1. Основной задачей исследований является создание в закладочном массиве структурных образований низкой основности для улучшения механических характеристик закладочного массива как элемента системы разработки.

1.5. ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЮЖНО-БЕЛОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На Запорожском железорудном комбинате разрабатывают богатые гематито-мартитовые руды Южно-Белозерского месторождения (содержание Fe > 60 %) в сложных горно-геологических условиях с использованием этажно-камерной системы разработки с поэтажной отбойкой руды глубокими скважинами и с последующим заполнением выработанного пространства твердеющей смесью.

Сложные условия определяются залеганием в кровле рудно-кристаллического массива водоносных горизонтов, неустойчивыми породами висячего бока с коэффициентом крепости по шкале профессора М.М. Протодьяконова $f = 4 - 8$, глубиной разработки 330 – 940 м, трещиноватостью массива, а также обводненностью самой рудной залежи. Эти факторы обуславливают повышенные требования к прочности закладочного массива. Фактические вывалы закладочного массива наблюдались в его середине и в зонах соединения боков камеры с ее кровлей.

Прочность рудного массива колеблется от 30 до 120 МПа и характеризуется низкой и средней устойчивостью. Мощность залежи изменяется с севера на юг от 15 до 120 м. Угол падения залежи составляет в среднем 70°. Рудная залежь лежит на кварцево-серицитовых и кварц-хлоритовых сланцах. Их характеризуют как средне-груборассланцованные, окварцованные, коэффициент крепости по шкале профессора М.М. Протодьяконова $f = 7 - 9$, средней трещиноватости, средней устойчивости, прочностью 60 – 90 МПа. Висячий бок рудной залежи представлен кварцитами гематит-мартитовыми, средне-тонкополосчатыми, иногда смятыми в складки, средней трещиноватости, средней устойчивости, коэффициент крепости по шкале профессора М.М. Протодьяконова $f = 14 -$

15, реже – сланцами и серпентинитами прочностью на сжатие 120 – 160 МПа. Когда во вмещающих породах висячего бока залегают кварциты, вывалы случаются значительно реже. При наклонных обнажениях камеры и залегании сланцев в висячем боку обрушения в очистное пространство происходят чаще, поскольку сланцы имеют невысокий коэффициент крепости и обладают свойством расслаивания.

Устойчивость гематитовых руд по длине залежи в основном средняя, трещиноватость слабая и средняя с коэффициентом крепости по шкале профессора М.М. Протодьяконова от $f = 3 - 5$ до $f = 6 - 8$. Следует отметить, что в пределах этажа по вертикали крепость руды неравномерна.

Основные горные работы ведутся в этажах 640 – 740, 740 – 840 м. Проводятся горно-капитальные работы по подготовке запасов этажа 840 – 940 м. С переходом горных работ на эти горизонты давление пород висячего бока будет увеличиваться, что требует решения вопроса повышения прочности закладочного массива. Необходимо, чтобы искусственный массив очистных камер первой очереди обладал достаточной прочностью для предотвращения обрушения пород висячего бока по всей длине рудной залежи.

По рудной площади очистные камеры отрабатываются группами через целик, равный ширине камеры. Ширина камер колеблется от 15 до 30 м в зависимости от мощности залежи, устойчивости руды и вмещающих пород. В среднем размеры камер составляют (м): высота – 80 – 120, ширина – 15 – 30, длина – 40 – 60. Камеры первой очереди заполняют твердеющей смесью и через 3 месяца, когда закладка достигнет нормативной прочности, приступают к отработке вторичных камер.

Увеличение глубины разработки наряду с удорожанием закладочных материалов приводит к тому, что необходимо проводить научные исследования для совершенствования состава закладочной смеси. В 2001 г. в результате исследований, проводимых научными сотрудниками НИГРИ, рекомендовано в состав закладочной смеси добавлять до 30 % от количества инертного заполнителя дробленые породы, получаемые при проведении горных выработок, что привело к существенному снижению затрат на инертный заполнитель.

С понижением глубины горных работ в висячем боку большую часть рудной залежи перекрывают оталькованные серпентиниты, кварц-хлорит-серицитовые сланцы, которые не допускают значительных обнажений. При отработке камер в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м наблюдаются вывалы пород со стороны висячего бока, что связано с большими размерами камер (ширина 30 м) и, как следствие, снижением устойчивости [46, 47].

Вывалы руды, вмещающих пород и закладки наблюдались уже при отработке камер этажей 465 – 580 и 548 – 640 м. Объемы вывалов достигали 50 – 70 тыс. т. Наибольшее количество вывалов закладочного материала наблюдалось в южной части залежи, где повышенная трещиноватость и низкие значения крепости руд и вмещающих пород. Средняя прочность закладочного массива для этих глубин составляет 5,1 –

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

5,5 МПа. Форма камер этажей 465 – 580 и 548 – 640 м отличается от камер этажей 640 – 740 и 740 – 840 м высотой и конструкцией днища. Характер разрушений для нижних этажей повторяется из-за несовершенства состава закладки и его низкой прочности.

Разрушения закладочного массива отмечены при разработке запасов на глубоких горизонтах 640 – 740, 740 – 840 м, что приводит к разубоживанию руды при выпуске из камер (рис. 1.3). При выемке запасов руд из междукamerных целиков, сосредоточенных в окружении закладочного массива (с не менее двумя контактами) разубоживание достигает 4,5 %, в то время как из рудного массива со стороны висячего бока – 2,6 %, а лежачего бока – 0,9 %.



Рис. 1.3. Разубоживание руды закладочным материалом при погрузке самоходной техникой (гор. 825 м)

За последние десять лет на Запорожском железорудном комбинате добыча руды возросла на 36 % от 3,2 до 4,5 млн т в год. С увеличением интенсивности извлечения руды объем уложенной закладки в выработанном пространстве также возрос (рис. 1.4).

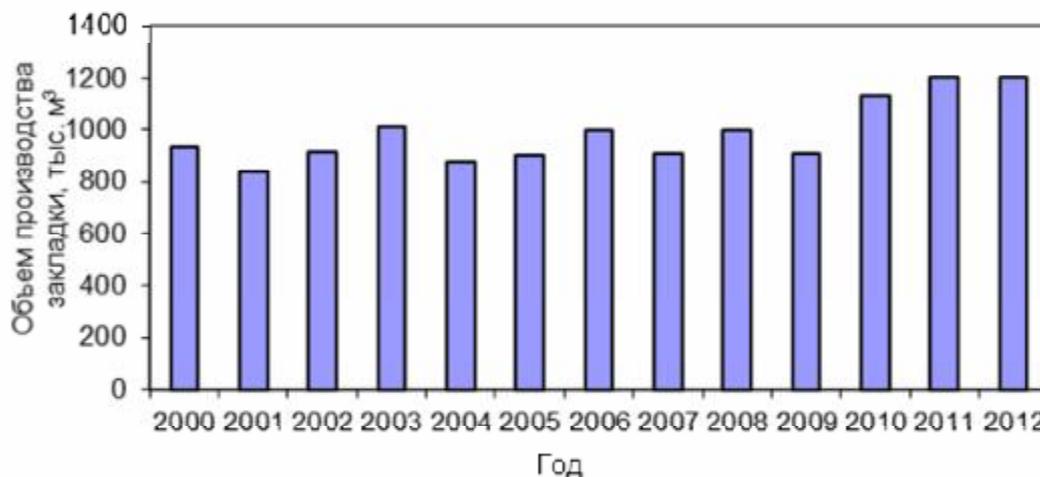


Рис. 1.4. Диаграмма производства закладочных работ за 2000 – 2012 гг.

Неравномерность распределения объема закладки выработанных очистных камер за рассматриваемый период объясняется переходом ведения закладочных работ на следующий год. Однако отмечается устойчивая тенденция возрастания объемов закладочных работ с увеличением добычи руды.

Исследованием составов закладочной смеси для комбината занимались ученые П.В. Швыдько и В.М. Латыпов, предложившие в качестве инертного заполнителя твердеющей закладки использовать отсев флюсового известняка Докучаевского флюсо-доломитного комбината, который в случае попадания в отбитую руду оказывает положительное влияние на качество выплавки стали. Однако не рассматривалось влияние доменного гранулированного шлака и отсева флюсового известняка с позиции упрочнения структурных связей в закладочном массиве.

В результате научных исследований в области совершенствования составов закладки и технологии закладочных работ принято решение о целесообразном применении на комбинате камерной системы разработки с твердеющей закладкой. В итоге:

- использование доменного шлака в качестве основного вяжущего позволило практически полностью отказаться от дорогостоящего портландцемента;

- за счет добавления крупнокускового заполнителя (горной породы) в состав закладочной смеси удалось увеличить прочность массива с 4 – 5 до 6 – 7 МПа и снизить затраты на закладочные работы;

- использование отсева флюсового известняка позволило снизить негативный эффект от попадания закладки в руду;

- по сравнению со шлакопесчаной закладкой снизилось разубоживание.

Наряду с достоинствами принятой твердеющей закладки на комбинате существует и ряд недостатков, а именно:

- используемая тонкость помола 50 – 55 % частиц крупностью -0,074 мм не обеспечивает в полной мере раскрытие вяжущих свойств доменного шлака;

- при возведении закладочного массива неравномерно формируется его прочность (колебания достигают 80 %);

- высокий расход шлака при заполнении камер первой очереди – до 600 кг/м³;

- при заполнении очистного пространства формируется неоднородный разнопрочный массив с четко выраженной слоистостью;

- имеет место разубоживание отбитых камерных запасов закладочным материалом.

Основным регламентирующим документом при производстве закладочных работ является «Технологическая инструкция производства закладочных работ на Запорожском железорудном комбинате», разработанная НИГРИ (г. Кривой Рог). Приготовление твердеющей смеси для заполнения выработанных пространств осуществляют на поверхностном закладочном комплексе производительностью до 300 м³/ч.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Закладочный комплекс расположен на поверхности практически в центре над рудной залежью, что сокращает расстояние транспортирования закладочной смеси к выработанному пространству. В настоящее время принят следующий состав закладки (кг/м³): молотый доменный гранулированный шлак «Запорожсталь» – 400 – 500, отсев флюсового известняка Докучаевского флюсо-доломитного комбината – 900 – 1150, отвальная дробленая горная порода – 400 – 500, вода – 350 – 400.

В состав комплекса входит пункт разгрузки сыпучих материалов, склад материалов, главный корпус и смеситель. Со склада шлак и известняковый флюс по отдельным конвейерным линиям поступают в цепь аппаратов главного корпуса. Порода измельчается в крупнокусовой дробилке, расположенной на породном отвале до фракции 20 мм, грузится в вагоны и поступает в главный корпус закладочного комплекса.

Измельчение доменного шлака осуществляется в двух шаровых мельницах мокрым помолом производительностью по 60 т/ч каждая. Выход фракции составляет 50 – 60 % частиц крупностью -0,074 мм. Плотность пульпы на выходе из мельницы колеблется в пределах 1,45 – 1,55 г/см³. Все компоненты поступают в смеситель типа С-892, перемешиваются с водой и по закладочному трубопроводу подаются в подземное пространство.

За время эксплуатации Южно-Белозерского месторождения применялись несколько вариантов состава твердеющей закладки. Верхние этажи 400 – 480 м заполнены разнокомпонентной закладкой. Изначально использовали закладку состава (кг/м³): шлак – 400, цемент – 50, песок – 1200, вода – 400. При этом получали неудовлетворительную прочность 2,5 – 4 МПа. Высокое содержание SiO₂ до 60 % привело к разубоживанию руды, что осложнило технологию выплавки стали. Поэтому было решено заменить песок известняком Балаклавского рудоуправления. Составы твердеющей закладки на его основе показали высокую прочность 6 – 9 МПа. В связи с постепенным удорожанием транспортных расходов Балаклавский известняк был заменен на Докучаевский флюсовый известняк. При этом прочность закладки составила 5 – 8 МПа [48].

В табл. 1.2 и 1.3 приведены составы закладочной смеси, которые используют в настоящее время при заполнении отработанных камер.

Таблица 1.2

СОСТАВЫ ШЛАКО-ИЗВЕСТНЯКОВОЙ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ

Компоненты закладочной смеси	Составы				
	Расход материалов на 1 м ³ закладки, кг				
Отношение компонентов Ш:Д	1:3	1:4	1:4,5	1:5,5	1:7
Гранул. домен. шлак 55 % част.-0,074 мм	450 – 400	400 – 350	350 – 300	300 – 250	250 – 200
Отсев известняка до 5 мм	1450 – 1500	1500 – 1550	1550 – 1600	1600 – 1650	1650 – 1700
Вода	350 – 400	350 – 400	350 – 400	350 – 400	350 – 400
Объемн. масса, т/м ³	2,1 – 2	2,1 – 2	2,1 – 2	2,1 – 2	2,1 – 1,9
Прочность закладки, МПа	9 – 8	7 – 6	6 – 5	5 – 4	3 – 2,5

Таблица 1.3

СОСТАВЫ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ С ДОБАВЛЕНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД

Наименование компонентов	Содержание породы в закладочной смеси от объема инертного наполнителя, %				
	20	25	30	35	40
	Расход материалов на 1 м ³ закладки, кг				
Гранул. домен. шлак 55 % част. 0,074 мм	400				
Известняк (флюс)	1120	1050	980	910	840
Измельченные горные породы до 40 мм	290	362	434	507	579
Вода	400	400	400	400	400

Составами шлако-известняковой закладки, которая в основном состоит в из мелких фракций, заполняют часть выработанного пространства, где располагаются подэтажные выработки по высоте камеры. Эти смеси обладают высокой плотностью и повышенной прочностью. Для их приготовления требуются дополнительные затраты, так как шлак и известняк являются дорогостоящими материалами. При заполнении днища камер и на уровне расположения подэтажных выработок в состав закладочной смеси добавляют портландцемент, что удорожает закладочные работы.

Для заполнения пространств, не входящих в область подэтажных выработок, а также при заполнении камер второй очереди и камер незначительных размеров применяют закладочную смесь с добавлением отвальных дробленых пород для сокращения затрат на инертный наполнитель. При заполнении камер потолочины гор. 301 – 330 м используют составы с соотношением вяжущего к наполнителю 1:4,5 – 1:5,5.

Транспортирование закладочной смеси осуществляют по трем вертикальным скважинам, пройденным до горизонта 325 м, и одной – до горизонта 465 м. Диаметр трубопровода 219, 245 и 273 мм. Критическая скорость движения смеси составляет 1 м/с. Потеря подвижности закладочной смеси наступает через 7 – 10 ч, а ее схватывание – через 15 – 20 ч. Предельное напряжение сдвига составляет 0,98 – 1,47 МПа. В зависимости от дальности транспортирования осуществляется регулирование подвижности закладочной смеси. На практике, как правило, подвижность закладочной смеси находится в пределах 10,5 – 12 см.

Возведение закладочного массива производят в несколько этапов. Заполнение камеры начинают с днища, для его упрочнения добавляют цемент в количестве 10 кг/м³. Через сутки продолжают подачу смеси до подэтажных выработок, где установлены перемычки. Подэтажные выработки заливают отдельной порцией смеси для постепенного снижения давления на перемычки с добавлением цемента. Аналогично заполняют очистное пространство до следующих подэтажей, при достижении последнего закладка непрерывно подается под кровлю. При этом после прохождения перемычек уложенный слой закладки отстаивается в течение

16 – 20 ч до полного дренажа воды. Недостатком при заполнении камеры является расход цемента при заполнении днища и подэтажных горизонтов.

Таким образом, формируется неоднородная структура и слоистость заложеного массива, что снижает его устойчивость как несущего элемента. Кроме этого, в технологическом процессе происходят частые остановки закладочного комплекса, что ведет к неконтролируемому увеличению числа слоев уложенной смеси, закупорке закладочного трубопровода смесью, периодической промывке шаровых мельниц, а также остановки по команде из шахты. В итоге количество слоев закладочного массива может увеличиться на 20 – 30 %. В заполняемой камере прочность слоев по данным контроля закладочных работ может изменяться до 80 %. Изменение соотношения составляющих компонентов в расслоившейся части закладки уменьшает более чем на 1/3 расчетные прочностные свойства [49].

Из анализа условий применения твердеющей закладки при разработке Южно-Белозерского месторождения можно сделать вывод, что совершенствование составов твердеющей закладки осуществлялось в направлении изыскания материалов с более качественными физико-механическими и вяжущими свойствами, однако на сегодняшний день измельченный шлак является приоритетным и главным вяжущим материалом. Шлак «Запорожсталь» один из наиболее качественных материалов для приготовления закладочной смеси, что определяется высоким содержанием CaO и Al_2O_3 .

Изучению камерных систем разработки с твердеющей закладкой в условиях Южно-Белозерского месторождения посвятил свои труды В.П. Волощенко, который в результатах исследований заложил направления совершенствования составов твердеющей закладки. Одним из этих направлений являлась механическая или химическая активация компонентов закладки. Механическая активация рассматривалась как установка двухстадийной схемы измельчения вяжущего материала. В те годы высокопродуктивных энергосберегающих измельчительных агрегатов практически не существовало, однако в настоящее время существуют высокопроизводительные технологии измельчения строительных материалов. Для реализации механической активации в закладочных работах необходимы исследования в области структуры искусственного массива на основе тонкоизмельченных частиц для установления эффективности такого рода составов.

Данное направление имеет важное научное и практическое значение, так как при больших объемах закладочных работ снижение себестоимости и повышение качества закладочного массива является актуальным вопросом. В дальнейшем, развивая знания об активации компонентов, необходимо установить оптимум, при котором свойства закладочных материалов будут проявляться наиболее эффективно с учетом соблюдения экономических требований.

Для обоснования параметров технологии возведения твердеющей закладки на основе тонкоизмельченных частиц вяжущего, в частности,

компонентного состава и дисперсности материалов, прочности, режима заполнения очистного пространства, необходимо провести исследования минерального состава компонентов, особенностей структуры и состава получаемых новообразованных веществ в результате их взаимодействия с водой.

1.6. ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ ОЧИСТНЫХ КАМЕР ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ОЧЕРЕДЕЙ

При извлечении богатых железных руд камерными системами разработки с твердеющей закладкой имеют место разрушения закладочного массива камер первой очереди и его вывалы в очистное пространство камер второй очереди. Среди главных причин, влияющих на разрушения искусственных целиков можно выделить две.

Первая – включает в себя интенсивное проявление горного давления, сейсмическое воздействие буровзрывных работ на обнаженный закладочный массив, его слоистость и перебур скважин при отработке камер вторых очередей. Длина последнего может составлять 1,5 – 2 м, при этом наибольшее разрушение достигается при угле наклона скважин 80° [50].

Для предотвращения попадания закладочного материала в очистное пространство камер второй очереди оставляют рудную корку, которая не всегда сохраняется в силу воздействия сейсмических волн после массового взрыва и выдавливания низкопрочных слоев закладки. Наблюдениями за состоянием искусственных целиков установлено, что частичное разрушение бетонных целиков вызывается сейсмическим воздействием взрывов скважинных зарядов диаметром 100 мм, поэтому следует уменьшать диаметр скважин [51].

Вторая причина заключается в формировании слабоустойчивых структурных связей в закладочном массиве. При его возведении практически не учитываются химический состав, форма и условия образования внутренних связей твердеющей закладки к моменту отработки камер второй очереди. Изучению этой причины уделено мало внимания, в то время как соотношениям компонентов в твердеющей смеси посвящено достаточно много научных трудов. Причиной образования прочных связей с точки зрения химии и их разрушению при разработке рудных месторождений системами с закладкой до сих пор не уделяется должного внимания.

Большинство крутопадающих месторождений ценных руд отрабатываются в нисходящем порядке камерными системами разработки с твердеющей закладкой, что обусловлено наиболее быстрым вводом рудных площадей в эксплуатацию. Кровля очистных камер представлена закладкой, которая имеет прочность 3 – 7 МПа (в зависимости от принятого состава). В данном случае прочность закладочного массива обуславливается его устойчивостью к обнажению при отработке запасов руды, находящейся на контакте.

При восходящем порядке отработки этажных запасов руды вероятность разрушения кровли камер значительно выше, чем вертикального обнажения боков очистной камеры. Вывалы и отслоения в закладочных массивах приводят к разубоживанию руды. Здесь большое значение имеет химический состав компонентов закладочной смеси. Даже попадание небольшого количества закладки ведет к существенному снижению качества добываемой руды. Так, при содержании в руде 1,3 % окиси кальция осыпавшейся закладки содержание железа составляет 62 %, при 0,2 % CaO – возрастает до 67,5 % [52].

Исследования распределения НДС вокруг высоких очистных камер показали, что наибольшие области концентрации напряжений отмечались при выпуклости контуров камер в массив, при этом возникают растягивающие напряжения [53, 54, 55]. При выемке камерных запасов руды максимальные концентрации напряжений сосредоточены в днище, середине стенок камеры и кровле [56, 57, 58].

Разрушение закладки вышележащих камер происходят при отработке камер второй очереди. Это влечет за собой разубоживание руды, как на руднике Заполярный (17,4 %), Гайском ГОКе (11 %) и на многих др. [9]. Закладочный массив очистной камеры имеет слоистое, неоднородное строение, где прочность закладки по вертикали и горизонтали отличается на 25 – 30 % [59, 60]. Обладая недостаточной несущей способностью, закладочный массив выдавливается с боков заложенных камер или с кровли в очистное пространство. Под влиянием трещин происходит отслаивание наружного слоя закладки по вертикальным плоскостям или криволинейным поверхностям на величину до 1 м [61].

Таким образом, чтобы повысить устойчивость искусственного массива необходимо уделять внимание его структурным связям, которые формируются при взаимодействии компонентов закладки с водой, и использовать их свойства в зависимости от напряжений, возникающих в конструкциях систем разработки при ведении горных работ.

2. ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА НА СТРУКТУРУ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ

2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ

В работе использован комплексный физико-химический метод исследования структуры вещества для установления структурных особенностей в твердеющей закладке и влияния высокодисперсного вяжущего материала на свойства и прочность искусственного массива.

Для определения химических соединений в исходных компонентах закладки и затвердевшей ее фазе используем методы рентгенофазового и термического анализов, инфракрасной спектроскопии и растровой электронной микроскопии. В совокупности это позволит с высокой достоверностью получить данные о минеральном составе, структуре, форме доменного шлака, флюсового известняка, горной породы, а также о химическом составе и форме кристаллических новообразований в образцах затвердевшей закладки.

После затворения закладочных компонентов водой происходят процессы структурообразования. Следовательно, химический состав исходных материалов и продуктов гидратации оказывает влияние на прочность искусственного массива, которая увеличивается за счет структурных изменений, что требует изучения.

Рентгенофазовый анализ проводили на установке ДРОН-2. Подготавливаем тонкодисперсные пробы компонентов закладки крупностью менее 0,06 мм и фиксируем межплоскостные расстояния (d) при интенсивности отражения (I). По справочным данным устанавливаем химическое вещество. В естественном состоянии шлаки рентгеноаморфны. Резкое охлаждение шлакового расплава в процессе грануляции обуславливает в основном его стекловидное строение. Содержание стеклофазы в них составляет 65 – 97 %. Поэтому для установления фаз в доменном шлаке необходимо его обжечь до температуры 1000 °С [62].

Проводить рентгеноструктурный анализ образцов затвердевшей закладки не рекомендуется, так как общая масса кристаллических новообразований составляет менее 10 %, что весьма затруднительно при идентификации. Суть метода заключается в изучении дифракционной картины, получаемой при отражении рентгеновских лучей атомными плоскостями в структуре кристаллов [63, 64].

Термический анализ проводится на дериватографе Q-1500D. Пробы закладочных материалов и затвердевшей закладки также измельчаются до крупности -0,063 мм, после чего нагреваются от 0 до 1000 °С. Через 6 часов прибор регистрирует 4 кривых: ДТА – дифференциально-термическую (изменение количества тепла); ТГ – термогравиметрическую (изменение

массы); Т – температурную (рост температуры); ДТГ – дифференциально-термогравиметрическую (скорость изменения массы). Для получения данных о веществах, содержащихся в исследуемых пробах, достаточно использовать кривую ДТА. При помощи справочных данных по значениям тепловых эффектов ДТА определяется наличие минералов в образце. Метод основан на важнейших свойствах вещества, связанных с его составом и структурой, отображающихся на тепловых изменениях вещества при его нагревании или охлаждении [63, 65, 66].

Инфракрасные (ИК) спектры образцов компонентов закладки снимали на приборе SPECORD-75IR. Для получения ИК - спектра пробы достаточно 0,5 – 3 мг тонкоизмельченного материала. Съёмка проб доменного шлака, отходов флюсового производства, кварц-хлорит-серицитовых пород, образца затвердевшей закладки при традиционном и увеличенном измельчении доменного шлака осуществляется в интервале длин волн $4200 - 400 \text{ см}^{-1}$. Полученные спектрограммы идентифицируются в соответствии со справочными данными о проявленной минералом интенсивности при определенной длине волны.

Метод основан на явлении поглощения группами атомов испытуемого объекта электромагнитных излучений в инфракрасном диапазоне. Поглощение связано с возбуждением молекулярных колебаний квантами инфракрасного света. При облучении молекулы инфракрасным излучением поглощаются только те кванты, частоты которых соответствуют частотам валентных, деформационных и вибрационных колебаний молекул [67].

Исследования микроструктуры, а также фазового и количественного состава компонентов твердеющей закладки и искусственного камня осуществляли при помощи растровой электронной микроскопии [68, 69]. Используя электронный микроскоп-микроанализатор РЕММА-102-02, появляется возможность получить качественные фотографии форм структур исследуемых образцов при увеличении 50 мкм (рис. 2.1). Встроенный рентгеноспектральный микроанализатор дает возможность производить замеры химического состава структурных образований твердеющей закладки.

Для установления степени влияния мелкодисперсных частиц на структурные и прочностные особенности твердеющей закладки исследовались вышеуказанными методами пробы тонкоизмельченного доменного гранулированного шлака, отходов флюсового известняка со средним диаметром частиц 20 мкм, кварц-хлорит-серицитовых пород крупностью -1,25 мм, изломы образцов закладочного камня, сформированного при различной удельной поверхности 2000, 2800, 4300 и $6600 \text{ см}^2/\text{г}$.

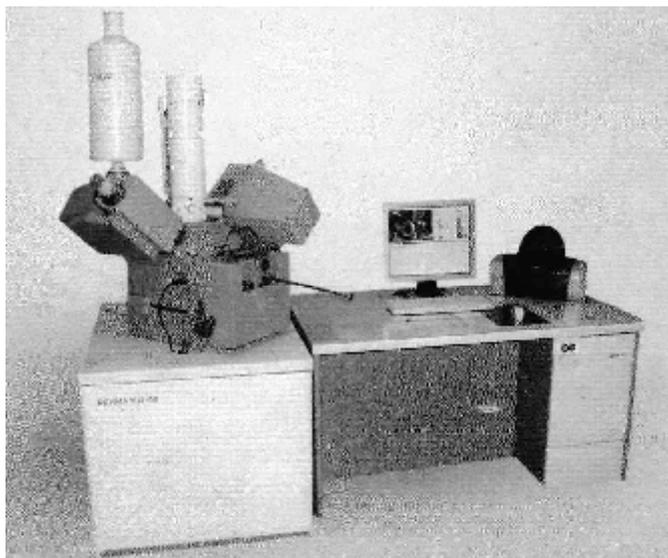


Рис. 2.1. Общий вид микроскопа-микроанализатора РЕММА-102-02

Исследуемая поверхность излома образца твердеющей закладки представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Поверхности излома образца твердеющей закладки

Изучаются формы и размеры частиц образца, а также межзерновые связи, формируемые в процессе твердения закладки. С помощью микрорентгеноспектрального анализатора в каждом образце проводится от 1 до 5 замеров количественного содержания основных оксидов CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 . Методика замеров химического состава заключается в исследовании всего поля частиц на снимке для обнаружения частицы вещества с разным химическим составом или содержанием оксидов. При этом по проведенным ранее анализам (РФА, ДТА, ИК) известен приблизительный минеральный состав исследуемого материала, что

облегчает идентификацию веществ этим методом. В результате проведения замеров получаем спектры оксидов, далее программное обеспечение микроскопа производит расчет данных спектров и выводит на ЭВМ содержание оксидов в процентном соотношении. Метод основан на определении контрастов электронного изображения дифракцией электронов.

В результате исследования определяются факторы, влияющие на прочность твердеющей закладки, и осуществляется анализ необходимых структурных образований для ее повышения.

Целью лабораторных исследований является установление свойств и параметров закладочных смесей на основе вяжущего тонкого измельчения, необходимых для формирования устойчивого закладочного массива.

Для исследования принимается состав твердеющей закладки на основе разработок НИГРИ (г. Кривой Рог): доменный гранулированный шлак – 400 кг; инертными заполнителями служат отходы флюсового известняка – 1050 кг и дробленые отвальные породы – 362 кг, расход воды составляет 350 – 400 л. Общая масса компонентов закладки 1812 кг без учета воды на затворение. Данный компонентный состав при разных значениях удельной поверхности вяжущего материала не исследовался.

Влияние удельной поверхности вяжущего материала на свойства закладочных смесей определяем путем измельчения доменного шлака и флюсового известняка в лабораторной газоструйной установке УСИ-20, расположенной на полигоне Института технической механики, г. Днепропетровск (рис. 2.3). Удельную поверхность частиц определяем с помощью прибора Товарова. Входная фракция доменного шлака и флюсового известняка в струйную мельницу должна составлять не более 2,5 мм.



Рис. 2.3. Общий вид струйной установки УСИ – 20

Поэтому с помощью стандартного набора сит отсеиваем фракции более 2,5 мм. Подробный исходный гранулометрический состав шлака и отходов флюса после просеивания изложен в работе [70]. Измельченные компоненты закладки доставлялись в лабораторию закладочного комплекса, где осуществлялось затворение закладочных смесей.

Для установления влияния удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса на прочность твердеющей закладки при измельчении зададимся получением проектной удельной поверхности частиц доменного шлака 3000, 4000 и 6000 $\text{см}^2/\text{г}$, которую позже уточним экспериментально. Согласно эмпирической зависимости [71], приведенной на рис. 2.4, определим необходимую частоту вращения классификатора струйной мельницы для получения требуемой удельной поверхности.

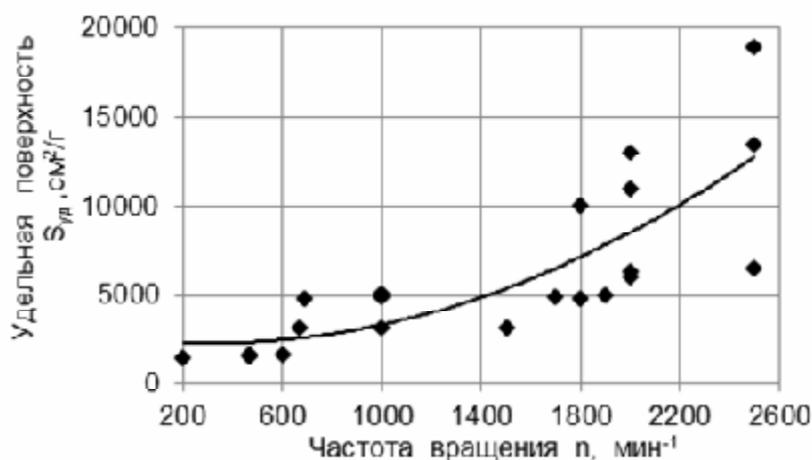


Рис. 2.4. Зависимость удельной поверхности от частоты вращения струйной мельницы

На рис. 2.4 показано, изменение величины удельной поверхности $S_{уд} = f(n)$ измельченных порошков (шамот, известняк, шлак, песок, уголь) в зависимости от частоты n вращения классификатора лабораторной установки. Видно, что в диапазоне $n = 200 - 2600 \text{ мин}^{-1}$ $S_{уд}$ порошков возрастает от 2000 до 19000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Для проведения экспериментальных исследований проектные режимы измельчения шлака и отходов флюса приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**ПРОЕКТНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШЛАКА
И ИЗВЕСТНЯКА В ЛАБОРАТОРНОЙ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

Серия опытов	Материал	$P, \text{МПа}$	$n, \text{мин}^{-1}$	$S_{уд}, \text{см}^2/\text{г}$
1	Шлак	0,3	800	3000
2	Известняк	0,3	800	3000
3	Шлак	0,3	1200	4000
4	Известняк	0,3	1200	4000
5	Шлак	0,3	2000	6000
6	Известняк	0,3	2000	6000

Доменный шлак и отходы флюсового известняка необходимо измельчить до проектных значений удельной поверхности при различной частоте вращения ротора n (мин^{-1}) с дальнейшим испытанием в закладочных смесях. Основной задачей измельчения вязущих материалов закладки является подготовка шлака и отходов флюса определенной дисперсности для закладочных смесей и установление характера влияния и значения тонкодисперсных частиц при формировании закладочного массива. Выбор способа измельчения и оборудования на основании результатов лабораторных исследований – второстепенная задача, которую решают специалисты обогащения полезных ископаемых.

По причине низкой эффективности ситового и седиментационного методов для оценки дисперсности измельченных шлака и отходов флюса применяем зерновой анализатор Multisizer-3, который также называют счетчиком Коултера (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Зерновой анализатор Multisizer-3

Принцип действия счетчиков Коултера заключается в измерении импульсов электрического тока, протекающего между электродами, помещенными в сосуды с электролитом, которые соединены капилляром. Амплитуда импульса тока пропорциональна объему частицы, проходящей по этому капилляру при перекачке суспензии из одного сосуда в другой. Полученные импульсы с помощью электронного устройства анализируются ЭВМ, которая в темпе эксперимента производит подсчет количества и относительного содержания частиц каждого размера. Результаты выводятся на дисплей, самописец или выдаются в цифровой форме. Счетчики Коултера позволяют определять размеры частиц в диапазоне от 0,4 до 1200 мкм [72].

С помощью прибора *Multisizer-3* измеряем фактическую удельную поверхность проб шлака и отходов флюса при каждом режиме измельчения. По результатам анализа дисперсности проб на ЭВМ получаем графики распределения фракций и их процентное соотношение.

Определяем средний диаметр частиц измельченного материала с помощью программного обеспечения прибора для установления полноты участия частиц в процессе взаимодействия компонентов закладки с водой. Определяем удельную поверхность частиц только доменного шлака, так как минералы, входящие в его состав, оказывают решающее влияние на прочность твердеющей закладки.

Перед проведением исследований технологических свойств закладочной смеси в зависимости от площади удельной поверхности частиц вяжущего материала необходимо приготовление исходной (традиционной) смеси. Для этого доменный гранулированный шлак измельчаем в лабораторной шаровой мельнице до тонкости измельчения 55 % частиц крупностью - 0,074 мм, которая соответствует тонкости измельчения производственных мельниц закладочного комплекса. После этого поочередно готовим экспериментальные закладочные смеси.

Для достоверности результатов исследования необходимо определить достаточное количество экспериментов. Под этим понимается количество испытуемых образцов твердеющей закладки при одинаковом составе закладочной смеси. Средняя прочность на сжатие трех образцов-кубов рассматривается как прочность закладки при условии, что коэффициент вариации значений не превышает 20 % [73]. Следовательно, достаточное количество образцов одного состава составляет $n=3$. Например, на Запорожском железорудном комбинате для исследования прочности закладки принимают три образца одного состава [74], на рудниках Норильска – два [75]. Проверка достоверности результатов сводится к определению коэффициента вариации: $V \leq 20$ %. Для нахождения коэффициента вариации вычисляем среднее значение X_{cp} показателей прочности трех образцов, дисперсию σ и показатель точности измерений ϵ с помощью метода планирования эксперимента [76].

Для достижения поставленной цели лабораторных исследований готовим закладочные смеси при расходе доменного шлака 100, 200, 300 кг/м³. При каждом расходе шлака пошагово изменяем удельную поверхность 2000, 2800, 4300, 6600 см²/г для установления рационального соотношения расход-дисперсность. Следовательно, необходимо приготовить 12 закладочных смесей 48 образцов твердеющей закладки для испытания на прочность в возрасте твердения 30 дней и 48 образцов – в возрасте 90 дней. Часть образцов некоторых составов твердеющей закладки приготовим в возрасте 180 дней твердения для получения зависимости изменения прочности во времени. В экспериментальных составах твердеющей закладки заменим 50 % доменного шлака измельченными отходами флюса аналогичной дисперсности, который является микронаполнителем закладочной смеси.

Приготовление экспериментальных закладочных смесей начинаем с расчета расхода компонентов на 12-литровую емкость, достаточную для заливки 9 кубиков-образцов закладки на один состав. Из одного замешенного состава изготавливаем образцы закладки для испытания на

прочность в возрасте 30, 90 и 180 дней (выборочно). Сначала в емкость добавляем дробленую породу, потом – отходы флюса с доменным шлаком и перемешиваем в сухом виде. Затем сухую смесь затворяем водой и перемешиваем в течение 10 мин. После перемешивания закладочные смеси исследуем на схватываемость, подвижность, предельное напряжение сдвига.

Методика исследования параметров твердеющей закладки заключается в использовании нормативных документов и личных дополнений авторов работы. Согласно принятым стандартам определяем подвижность, сроки схватывания, предельное напряжение сдвига и прочность закладки. Личные дополнения основываются на оценке измельченности вяжущего материала по удельной поверхности и определении дисперсности с помощью зернового анализатора *Multisizer-3*. Подвижность, предельное напряжение сдвига, прочность на одноосное сжатие устанавливали в соответствии со стандартной методикой [74].

Подвижность смеси устанавливаем с помощью прибора конус СтройЦНИЛА. Измеряем глубину погружения конуса в закладочную смесь. В емкость с сухими компонентами добавляем количество воды 350 – 400 л/м³, чтобы подвижность находилась в пределах 10 – 12 см.

Предельное напряжение сдвига смеси находим с помощью прибора Штернбека. Усилие F фиксировали в момент начала сдвижения участка трубопровода относительно смеси. Предельное напряжения сдвига смеси должно составлять не более 1,96 МПа.

Предельное напряжение на сдвиг находим по формуле:

$$\tau_o = \frac{3F}{4\pi dL}, \text{ МПа} \quad (2.1)$$

где F – масса воды, при которой происходит сдвигание трубы, Н;

d – диаметр трубы, м;

L – длина трубы, м.

Скорость схватывания смеси определяем при помощи прибора Вика согласно ГОСТ 26798.1-85. Измеряем глубину погружения иглы в закладочную смесь. Начало схватывания закладочной смеси должно происходить не ранее чем через 4 часа. Достаточно исследовать скорость схватывания состава закладочной смеси при максимальной удельной поверхности частиц шлака 6600 см²/г и затем сравнить ее с допустимым значением.

После определения технологических параметров каждый состав закладочной смеси разливался по металлическим формам размером 10x10x10 см. Кассеты с формами смазывали техническим маслом для предотвращения адгезии закладочной смеси с металлической поверхностью формы. Спустя день нумеровали поверхности образцов закладки каждого

состава. Твердеющая закладка отстаивалась в формах 3 – 4 дня до полной потери схватываемости и полного дренажа воды из образца. Далее формы разбирали, а образцы закладки помещали для хранения в специальные стеллажи. Образцы размещали в мокрых опилках с влажностью около 90 % и температурой 22 – 26 °С для имитации подземных условий.

Прочность твердеющей закладки на одноосное сжатие определяли посредством раздавливания образцов на гидравлическом прессе при температуре окружающей среды. Порядок испытания и требования, предъявляемые к образцу, определяются стандартной методикой, принятой Международным бюро по механике горных пород.

Раздавливанию подлежат экспериментальные образцы прочности в возрасте 30, 90 и 180 дней после заливки. В журнал заносили следующие данные: номер образца; площадь поперечного сечения S (см), определяемая замерами штангенциркулем; величину разрушающего усилия F (Н), зафиксированную на шкале прессы. Прочность образца определяли по формуле:

$$P = \frac{F}{S}, \text{ МПа} \quad (2.2)$$

где F – разрушающее усилие, Н;

S – соприкасающаяся площадь образца с прессом, см².

Образец закладки в прессе необходимо нагружать со скоростью 0,3 – 0,5 МПа. Используем пресс со шкалой прочности до 10 МПа серии ПСУ-100, если прочность закладки превышает указанную величину, необходимо использовать пресс до 50 МПа серии ПСУ-120. Гидравлический пресс предназначен для испытания твердеющей закладки, набрызгбетона и бетонных изделий на прочность. По результатам динамики набора прочностной характеристики принимают решение: можно ли использовать данный состав в существующих горно-геологических условиях. Сведения об основных технологических параметрах твердеющей закладки записывали в журнал испытаний.

Для изучения монолитности закладочного массива в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м был принят косвенный метод. Изучались производительность закладочного комплекса, время его работы, количество остановок шаровой мельницы, состав закладочной смеси, подвижность, тонкость помола, прочность твердеющей закладки при сроке затвердевания 90 дней, объем камер под закладку.

Исследование распределения прочности в закладочном массиве осуществлялось по слоям, которые образовались в выработанном пространстве и отличаются составом закладочной смеси. Количество слоев в закладочном массиве рассчитывали по данным прерывания подачи закладочной смеси при условии, что между ними прошло не менее 20 ч.

Прочность в слоях закладочного массива определялась на основании результатов испытаний образцов закладки, отобранных из бункера-смесителя перед транспортированием в выработанное пространство. Допускаем, что прочность образцов отвечает прочности слоя отвердевающей закладки в камере.

Для расчета высоты заполнения слоя закладки в выработанном пространстве фактическая длина и ширина первичных камер по горизонтам принималась из работы [54]. С учетом фактических размеров камер (длина, ширина) была рассчитана высота заполнения закладочной смесью выработанного пространства. Предполагается, что рассчитанные объемы слоев закладки заполняют очистное пространство по высоте камеры. Допускаем, что прочность образцов закладочных смесей соответствует прочности слоя твердеющей закладки в камере. Далее строим графики распределения прочности закладки по высоте камеры.

Для реализации принятой методики требуется проведение экспериментальных исследований. Основной задачей исследований является установление закономерностей формирования структуры и прочности закладочного массива от площади удельной поверхности шлака и отходов флюса.

2.2. СТРУКТУРНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА

Для обоснованного выбора состава твердеющей закладки высокой прочности при отработке запасов руды на глубоких горизонтах необходимо рассмотреть процессы структурообразования тонкодисперсных фракций шлака и отходов флюса и взаимодействие между минералами. Большое значение в закладочных материалах имеет химический состав, а именно содержание главных оксидов в твердеющей закладке, которые создают устойчивые, прочные связи или их ослабляют (табл. 2.2).

Таблица 2.2

СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ОКСИДОВ В ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Компонент	Содержание, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	TiO	MnO
Доменный гранулированный шлак завода «Запорожсталь»	37,8 – 39,5	6,3 – 7,7	47,4 – 49,4	3,75 – 5,1	-	-	0,68 – 1,23
Отходы флюсового производства (Докучаевский комбинат)	4,56	1,16	51,66	1,97	0,27	-	-
Отвальная дробленая порода	55,42	8,12	0,9	6,84	25,7	0,12	1,6

В закристаллизованных доменных шлаках, содержащих до 4 – 6 % MgO и до 5 – 10 % Al₂O₃, обнаруживают обычно двухкальциевый силикат, ранкинит и мелилит с преобладающим содержанием геленитовой составляющей.

Шлаки обычно состоят на 90 % из стекла. Минералогический состав доменного гранулированного шлака соответствует фазе мелилита. В кристаллическом виде шлаки не реакционноспособны, однако в некристаллическом – прослеживается способность к гидратации [77, 78, 79]. Доменный гранулированный шлак завода «Запорожсталь» находится в стекловидном состоянии, вследствие быстрого охлаждения. В нем содержатся мелилит и псевдоволластонит [80].

Основной фазой химического состава флюсового известняка при высоком содержании CaO и низком MgO является кальцит, присутствуют примеси доломита и волластонита.

Вмещающие породы рудной залежи «Главная» в основном представлены кварц-хлорит-серицитовыми сланцами, которые отправляют в отвалы. Их химический состав содержит целую группу минералов класса слюд. При содержании 25 – 30 % железа в составе пород присутствует гематит. На отдельных участках пород всякого бока встречаются карбонизированные сланцы. Их целесообразно отдельно размещать на отвале и использовать в качестве инертного заполнителя для упрочнения структурных новообразований в закладочном массиве.

Минералы группы слюд являются инертными и в процессе гидратации закладочной смеси не участвуют. Кроме этого, весьма плохо связываются в цементный камень породы, содержащие гидрослюды (мусковит, серицит, хлорит), наиболее благоприятны – карбонатные породы [81]. Наличие слюдяных пород в заполнителе твердеющей закладки нежелательно, так как в присутствии некоторых химически активных продуктов гидратации вяжущего материала могут произойти превращения слюды в другие нежелательные модификации [82]. Гидратация в твердеющей закладке подчиняется общим законам твердения минеральных веществ, прочность которой зависит от формируемых химических соединений, их состава и формы.

Рассмотрим продукты гидратации в закладочном массиве при тонкости измельчения 55 % частиц крупностью - 0,074 мм. Минералы шлака начинают проявлять вяжущие свойства в процессе гидратации. Кальцит известняка также может проявлять вяжущие свойства. При изготовлении цемента иногда добавляют $CaCO_3$ в качестве микрозаполнителя для улучшения физико-технических свойств. Известняк же поступает в закладку крупностью до 5 мм, следовательно, доля тонких частиц минимальна, что не может оказывать существенного влияния на прочность.

Минералы доменных гранулированных шлаков, окерманит ($2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$), геленит ($2CaO \cdot Al_2O_3$), входящие в состав мелилита, а также псевдоволластонит ($\alpha-CaO \cdot SiO_2$), находятся в стекловидном состоянии, в естественном – практически не проявляют вяжущих свойств [83]. С течением времени на поверхности зерен минералов образуется гелевидная масса гидросиликатов кальция. При измельчении доменных шлаков гидравлическая активность минералов повышается. Как отмечается

в работе [77], при удельной поверхности 4000 – 6000 см²/г минералы шлака интенсивно проявляют гидравлическую активность.

При механическом воздействии на доменный шлак свежееобразованная поверхность частицы имеет высокую реакционную способность, обусловленную накоплением поверхностной энергии. У новых свежееобразованных поверхностей значительно более высокие значения поверхностной энергии, что обуславливает их повышенную адгезионную активность. Особое энергетическое состояние новых поверхностей измельченных минеральных материалов – кварца, известняка, магнезита, гипса и др. – можно объяснить образованием большого количества ненасыщенных валентных связей. Так, при измельчении кристаллов кварца в результате разрыва значительного количества связей *Si-O* на поверхности зерен образуются ионы Si^{4+} , O^{2-} [84]. Вода в закладочной смеси, вступая в контакт с трещинами и полостями поверхности тонкодисперсных шлаковых частиц, способствует переводу катионов с поверхности в состояние раствора вследствие разрыва кремнекислородных связей [85].

Главными оксидами доменного шлака являются *CaO* и *SiO₂*, содержание которых составляет 85 % и более. При этом в структуре шлаковых минералов происходит разрушение связей преимущественно ионных *Ca-O* и ковалентных *Si-O*. Энергия данных типов связей составляет 1075,6 и 1861 кДж/моль соответственно [83], что свидетельствует о большей подверженности ионных связей *Ca-O* к разрушению. Можно сделать вывод, что на поверхности измельченных частиц шлака образуется большее количество ионов кальция Ca^{2+} , чем ионов Si^{4+} . Кроме этого, растворимость вещества с увеличением дисперсности повышается. Оставшееся содержание кремнезема находится в аморфном состоянии.

Из этого следует, что необходимо содержащийся кремнезем преобразовать из аморфного состояния в активное для увеличения его содержания в прочных кристаллических образованиях закладочного массива. На рис. 2.6 представлена зависимость изменения аморфности кремнезема от удельной поверхности.

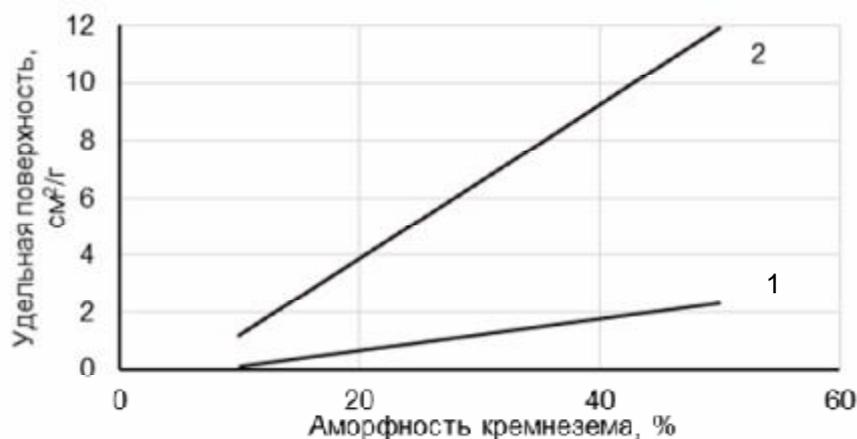


Рис. 2.6. Зависимость изменения аморфности кремнезема от величины удельной поверхности [86]: при активации в дезинтеграторе (1) и в вибромельнице (2)

В процессе гидратации будет формироваться гидросиликатный гель с преобладанием в его структуре слабой ионной связи Ca-O. Это объясняет сравнительно невысокую прочность закладки 5 – 6 МПа при высоком расходе доменного шлака 400 – 450 кг/м³ и отходов флюса 1000 – 1100 кг в составе смеси.

В результате гидратации мелилитоподобных минералов образуется большое количество гелей и коллоидных растворов, кристаллические вещества почти полностью подавляются [87]. При грубом помоле шлаковых минералов показатель основности составит $CaO/SiO_2 \geq 1,5$. Следовательно, в процессе структурообразования искусственного массива из твердеющей закладки участвует недостаточное количество активированного кремнезема. Можно сделать вывод, что удельная поверхность частиц оказывает влияние не только на увеличение числа контактов и плотность взаимодействия между частицами, но с позиции химических представлений – также и на конечный показатель основности CaO/SiO_2 , который определяет прочность кристаллических образований.

Образование гелевидных гидросиликатов кальция в закладочном массиве нежелательно. Выработанное пространство очистных камер заполняются большим объемом закладки. По его середине твердение происходит достаточно медленно, в отличие от борта камеры. Это влияет на устойчивость искусственного массива. При нормальных условиях гидравлически активные фазы шлака медленно твердеют и характеризуются невысокой прочностью [88].

Различия в составе и морфологии гидросиликатных гелей могут быть объяснены неодинаковыми условиями гидратации и непрореагировавшими силикатами кальция, а также разной степенью дефектности частиц при измельчении. Следовательно, при тонкости измельчения 55 % частиц крупностью -0,074 мм рост кристаллических связей будет достаточно медленным. Вследствие меньшей активности минералов шлака, по сравнению с минералами портландцементного клинкера, а также неоднородности частиц шарового помола при взаимодействии с водой гидратация будет протекать неравномерно без перенасыщения ионами. В результате образуются высокоосновные гидросиликаты кальция переменного состава, находящиеся в гелевидной форме, которые принято относить к группе C-S-H (II) (рис. 2.7).

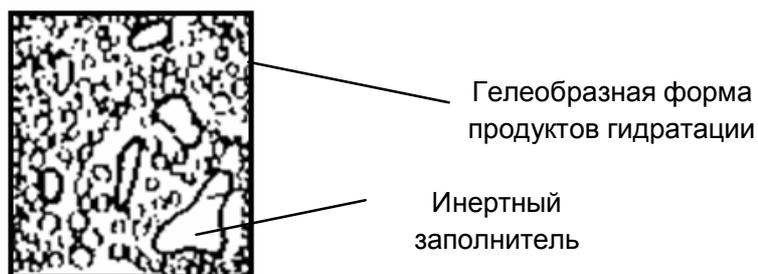


Рис. 2.7. Структура искусственного камня, содержащая высокоосновные гидросиликаты кальция [89]

Если при гидратации клинкерных минералов гидросиликатный гель находится в течение нескольких суток, то при гидратации минералов шлака этот процесс более длительный. Продукты гидратации шлаковых минералов схожи с цементным клинкером, однако отличаются меньшим содержанием CaO и H_2O [85]. Гель (C-S-H) сходен по составу с тоберморитом, поэтому его часто называют тоберморитоподобным.

Заметные различия в морфологии, а также в рентгенограммах позволяют установить разницу между C-S-H (I) и C-S-H (II): C-S-H (I) с отношением $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1,5$ представляет собой слоистый гидросиликат кальция, а C-S-H (II) с отношением $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1,5$ – в основном волокнистый гидросиликат кальция [90, 91]. При высоком отношении $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 2 - 3$ гидросиликаты кальция обладают округлой формой частиц и образуются в виде геля. Низкоосновные гидросиликаты кальция представляются в виде $(0,8-1,5) \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5-2,5)\text{H}_2\text{O}$, высокоосновные – $(1,5-2) \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1-4)\text{H}_2\text{O}$ [63].

Представленные в шлаке минеральные вещества являются продуктами гидратации, но их низкая активность, по сравнению с цементами, при взаимодействии с водой, формирует высокоосновные гидросиликатные структуры. Гель (C-S-H) кроме алюминия, железа и серы может содержать небольшое количество магния, натрия, калия, а также следы титана и хлора [91]. Следовательно, в результате гидратации шлаков в составе гидросиликатов кальция присутствуют оксиды Al_2O_3 , MgO , FeO .

При увеличении тонкости измельчения до 100 % частиц - 0,074 мм все активные минералы шлака принимают участие в гидратации. Если содержание частиц крупностью -0,074 мм составит 100 % и в закладочную смесь будут добавлены отходы флюсового известняка в качестве микронаполнителя, то количество ионов Si^{4+} повысится, а часть ионов слабой связи Ca^{2+} перейдет на формирование четырехкальциевого монокарбонатного гидроалюмината $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. Это приведет к выравниванию содержания ионов $\text{Ca}^{2+} \approx \text{Si}^{4+}$ в закладочной смеси и формированию при твердении гидросиликатов кальция низкой основности волокнистого и слоистого типов $(0,8 - 1,5)\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{FeO}) \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5 - 2,5)\text{H}_2\text{O}$, структура которых изображена на рис. 2.8.

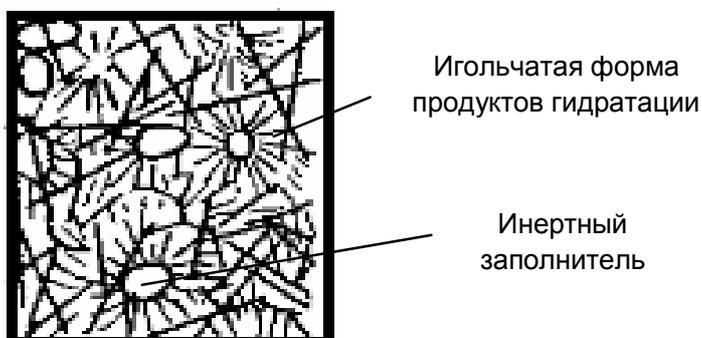


Рис. 2.8. Структура искусственного камня, содержащая низкоосновные гидросиликаты кальция [89]

Из изложенного следует, что для большего разрушения количества связей $Si-O$ необходимо увеличить степень дисперсности частиц, что также увеличит растворимость частиц силикатов кальция. Этому способствует появление микротрещин и дефектов в частицах при измельчении. В результате вода имеет контакт со всеми поверхностями. Следовательно, формируется прочная структура гидросиликатов кальция, которые обладают большей закристаллизованностью. Более тонкий размол шлаковых минералов позволит высвободиться большему количеству ионов кремния, что приведет к появлению в гидросиликатном геле прочных ковалентных связей. По некоторым данным, вклад ковалентных связей в прочность цементного камня составляет порядка 65 % [92].

В результате создаются условия для роста различных форм и структур гидросиликатов кальция, что приводит к повышению прочности. Тонкоизмельченная часть известняка, где содержится $CaCO_3$, проявляет способность к гидратации. Механизм формирования химического состава закладочной смеси приведен на рис. 2.9.

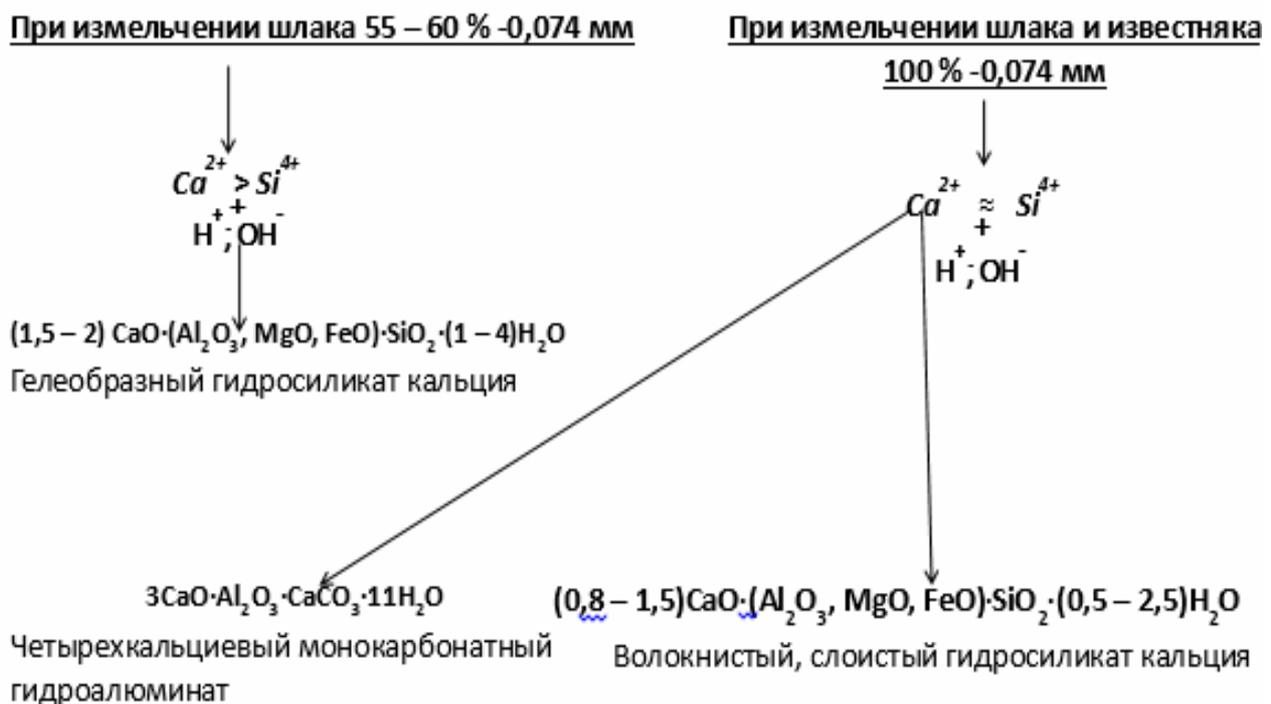


Рис. 2.9. Механизм формирования химического состава закладочной смеси на стадии измельчения вяжущих материалов

В данном случае измельченный кальцит будет взаимодействовать с водой и гелениновой частью мелилита, что приведет к образованию гидрокарбоалюмината кальция, который способствует упрочнению искусственного камня. Вследствие сбалансированности связей $Ca-O$ и $Si-O$ по причине увеличения разрыва связей $Si-O$ под действием тонкого

измельчения образуются гидросиликаты кальция меньшей основности $CaO/SiO_2 \leq 1,5$.

Появление в закладочном камне сформировавшихся кристаллических структур оказывает положительное влияние на прочность искусственного массива. Следовательно, чтобы повысить прочность закладочного массива камеры, необходимо создать прочные кристаллические связи в его структуре к моменту отработки запасов очистных камер второй очереди. В работах [37, 93] отмечается, что образование низкоосновных гидросиликатов кальция повышает прочность цементного камня, но при возникновении высокоосновных гидросиликатов его прочность снижается.

Для подтверждения теоретических предположений влияния дисперсности доменного шлака и отходов флюса на структуру, форму и химический состав кристаллических новообразований закладочного камня необходимо провести экспериментальные исследования химико-минералогического состава исходных закладочных материалов и экспериментальных образцов затвердевшей закладки методами анализа вещества.

2.3. ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОЧНОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО КАМНЯ

Для определения физико-химического влияния тонкодисперсных частиц на прочность твердеющей закладки необходимо изучить области их рационального добавления и величину дисперсности.

Уменьшение размера реагирующих зерен приводит к тому, что:

- увеличивается площадь поверхности и величина поверхностной энергии;
- возрастает скорость растворения и процесс диссоциации;
- уменьшается толщина слоя продуктов на поверхности зерен;
- появляется полное взаимодействие твердофазовых реакций.

При помоле и дроблении число частиц в объеме порошка и общая поверхность контактов возрастает. Реакционная способность твердых тел зависит от увеличения дисперсности. Установлено, что при размере зерен 20 – 40 мкм число контактов частиц на 1 см² площади равно $(1,8-4,2) \cdot 10^4$, а при зерне менее 20 мкм – $(2,1-3,9) \cdot 10^6$ [94].

На подземных рудниках черной и цветной металлургии тонкость измельчения основного вяжущего материала доводилась до 70 – 90% частиц крупностью -0,08 мм. Однако не установлена область рациональной дисперсности и расхода вяжущего по экономическим и технологическим причинам.

Влияние увеличения тонкости помола с 55 до 86 % частиц – 0,074 мм на прочностные свойства закладочной смеси для условий ЗЖРК выполнены В.П. Латыповым [95]. Использовали следующий состав закладки: шлак – 450 кг, песок – 1350 кг и вода – 450 л, прочность искусственного камня в трехмесячном возрасте составила 5,4 – 6,3 МПа, возросла на 16 %.

Измельчение шлака до большей тонкости в лабораторной мельнице весьма затруднительно. На измельчение 1 кг доменного шлака необходимо затратить 10 – 12 ч.

На Гайском руднике измельчение вяжущего до 70 – 75% частиц $-0,074$ мм позволило повысить прочность в 1,5 – 2 раза. Полученные показатели достигнуты при определенном компонентном составе закладочной смеси [31].

В связи с недостаточным опытом применения тонкодисперсных частиц в горнорудной промышленности и их влиянием на прочностные свойства твердеющей закладки рассмотрим технологии получения цементов для строительной промышленности, которые близки по свойствам к твердеющим смесям.

Установлено, что совместный дезинтеграторный помол товарного цемента с известняковым порошком и пластифицирующей добавкой повышает прочность образцов в начальные сроки твердения не менее чем на 46 % [96].

В работе [97] приводятся результаты экспериментальных исследований увеличения удельной поверхности клинкера и шлака при производстве портландцемента. Так, с увеличением удельной поверхности частиц от 2000 до 6000 $\text{см}^2/\text{г}$ прочность монолитного массива увеличивается в 4 раза.

При сравнении заводского цемента с удельной поверхностью частиц 2250 $\text{см}^2/\text{г}$ с домолотым цементом до удельной поверхности порядка 3000 $\text{см}^2/\text{г}$ прочность цементного камня возрастает на 10 МПа [98].

Исследования увеличения доли тонкой фракции шлака при производстве шлакощелочных вяжущих (ШЩВ) проводились при значениях с 3000 до 9000 $\text{см}^2/\text{г}$. Установлено, что оптимальная область дисперсности составляет 6500 – 7000 $\text{см}^2/\text{г}$, при этом прочность цементного камня возрастает в 2,5 раза (рис. 2.10) [99].

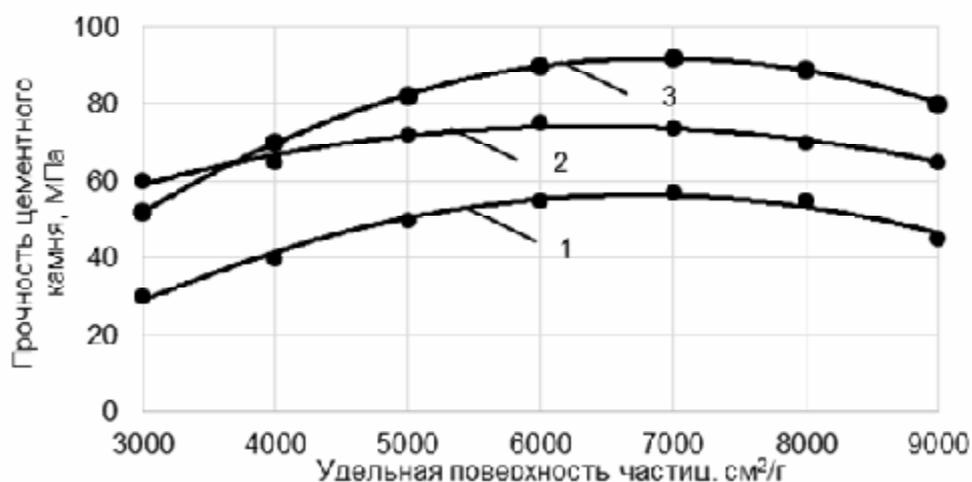


Рис. 2.10. Зависимость прочности ШЩВ от вида щелочного компонента и тонкости помола шлака [81]: едкий натр (1); сода (2); жидкое стекло (3).

С помощью струйной обработки строительных материалов (шлак, песок, цемент) в диапазоне удельной площади поверхности частиц $S_{уд} = 3000 - 9000 \text{ см}^2/\text{г}$ прочность композиций возрастает на 30 – 40 % [86].

Активность вяжущего материала повышается с увеличением дефектности поверхности частиц [100]. Это объясняется проникновением воды вглубь частицы активного минерала по микротрещинам, способствуя полной гидратации. Изменение физических свойств материала связано с изменением формы частиц при тонком измельчении, где проявляется их остроугольность.

Наряду с удельной поверхностью частиц на прочность оказывает влияние и количество самих частиц, которое выражается в расходе на 1 м^3 закладочной смеси. С увеличением расхода шлакоцемента прочность закладки возрастает по степенной зависимости (рис. 2.11) [40].

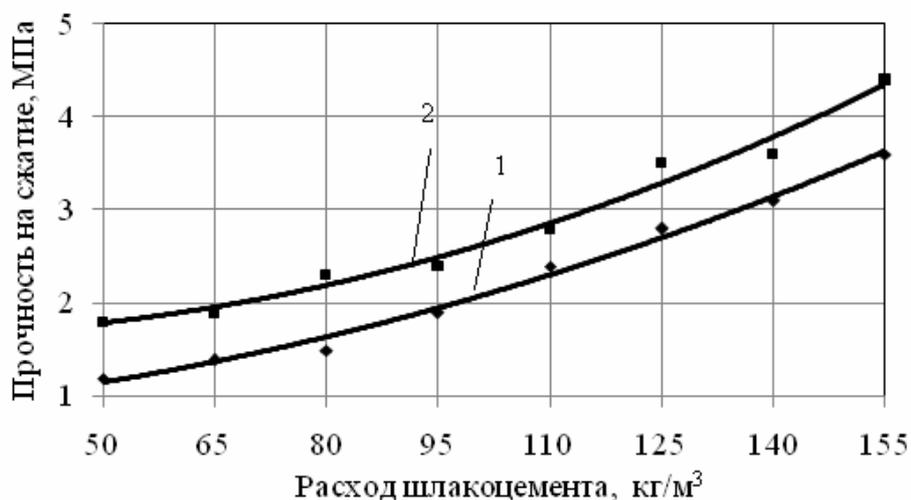


Рис. 2.11. Зависимость прочности твердеющей смеси в возрасте 1 года от расхода шлакоцемента: лабораторные образцы (1); керны (2)

Увеличение прочности ограничивается активностью минералов и экономическими соображениями. Как правило, при расходе $600 \text{ кг}/\text{м}^3$ набор прочности прекращается.

Средний диаметр частиц влияет на прочность. С уменьшением диаметра частиц возрастает полнота гидратации частицы. Так в процессе роста прочности цементного камня основную роль играет фракция размером 3 – 30 мкм [45]. Следовательно, фракции свыше 30 мкм являются инертными и в процессе фазовых превращений и новообразований не участвуют, а служат скелетом для искусственного камня. Это и объясняет вариации прочности в процессе заполнения выработанного пространства твердеющей смесью. При этом формируются слабоустойчивые новообразования, не удовлетворяющие условиям ведения горных работ системами разработки с закладкой. Желательно, чтобы в закладочной смеси содержалось не менее 15% частиц крупностью $-0,02 \text{ мм}$, что обеспечивает коллоидные свойства с поляризацией частиц [101].

В процессе формирования прочности твердеющей системы большое значение отводится поровому пространству искусственного камня [90]. Автор отмечает, что при одинаковой пористости прочность цементного камня снижается с увеличением пор. Размер пор и их количество зависят при прочих равных условиях от дисперсности вяжущих материалов. Расчеты показывают, что при среднем размере частиц цемента $d_{cp} = 30$ мкм в цементном тесте с $B/C=0,5$ содержится $1,4 \cdot 10^8$ пор величиной 34,5 мкм, а при более высокой дисперсности ($d=10$ мкм) – соответственно $5,2 \cdot 10^{10}$ пор со средним размером, равным 11,5 мкм. Наличие в искусственном камне мелкодисперсных частиц уменьшают число микропор.

Следовательно, физическими факторами вяжущего материала, влияющими на прочность закладки, следует считать средний диаметр частиц и расход вяжущего материала.

Из вышеизложенного следует, что увеличение удельной поверхности частиц приводит к повышению прочности композиций. При механоактивации диапазон измельчения материалов по удельной поверхности в среднем составляет от 2000 до 9000 см²/г. Однако отмечается неравномерный характер повышения прочности, что обусловлено разным химико-минералогическим составом исходных компонентов, условиями приготовления. Поэтому для каждого состава закладочной смеси оптимальная величина дисперсности должна устанавливаться экспериментально и в конкретных условиях. Для более точного обоснования дисперсности шлака и отходов флюса необходимо приготовить ряд экспериментальных составов закладочной смеси с пошаговым увеличением удельной поверхности частиц.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ НА ОСНОВЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОДГОТОВЛЕННЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Размер частиц вяжущего материала в твердеющей системе оказывает влияние на плотность и пористость монолитного камня: с его увеличением повышается плотность и прочность, снижается пористость. Величину размера частиц доменного шлака и отходов флюсового известняка оцениваем по удельной поверхности и среднему диаметру частиц, которые непосредственно влияют на расход вяжущего материала в закладочной смеси и на выбор измельчительного оборудования.

По методике, приведенной во втором разделе, при помощи поверхностемера типа Т-3 (прибор Товарова) определены значения удельной поверхности шлака после измельчения в шаровой мельнице и после обработки шлака в струйной мельнице. Результаты исследований приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Серия	Материал	P, МПа	n, мин ⁻¹	S _{уд.} см ² /г
Помол в шаровой мельнице				
1	Шлак	-	-	1999
2	Известняк	-	-	2334
Помол в струйной мельнице				
3	Шлак	0,3	800	2831
4	Известняк	0,3	800	2638
5	Шлак	0,3	1200	4259
6	Известняк	0,3	1200	4805
7	Шлак	0,3	2000	6593
8	Известняк	0,3	2000	6808

Из табл. 3.1 видно, что экспериментальные значения удельной поверхности незначительно отличаются от теоретических (табл. 2.2), что обусловлено разнообразием физико-механических свойств измельчаемых материалов. Для установления закономерностей влияния удельной поверхности на прочность закладки используем фактические значения только доменного шлака из табл. 3.1. Округляем фактические значения удельной поверхности доменного шлака, в результате получаем шаги ее изменения – 2000, 2800, 4300, 6600 см²/г. Максимальное увеличение удельной поверхности составило 3,3 раза по сравнению с поверхностью, полученной от помола в шаровой мельнице.

Исследования распределения содержания частиц при разной степени помола проведены на зерновом анализаторе Multisizer-3. Проба шарового помола выполнена в лабораторной мельнице закладочного комплекса. По результатам ситового анализа продукт измельчения флюсового известняка содержал 65 % частиц крупностью $-0,074$ мм. Пробы более тонкого помола струйной обработки имели удельную поверхность 2800, 4300 и 6600 $\text{см}^2/\text{г}$. Гистограммы распределения содержания классов фракций приведены на рис. 3.1 и 3.2. Установлен средний диаметр частиц $D_{\text{ср}}$ и оценена полнота участия частиц шлака в гидратации.

Анализ гистограмм показывает, что при грубом шаровом помоле распределение фракций подчиняется нормальному закону с расположением максимума симметрично по центру.

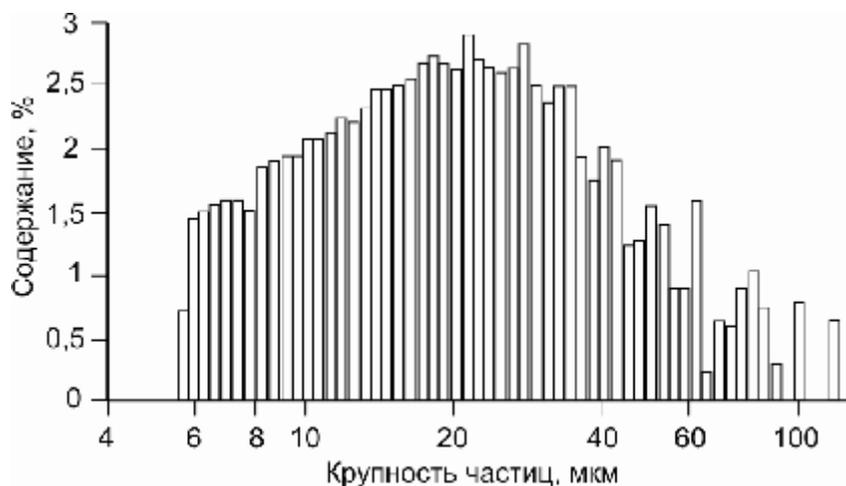
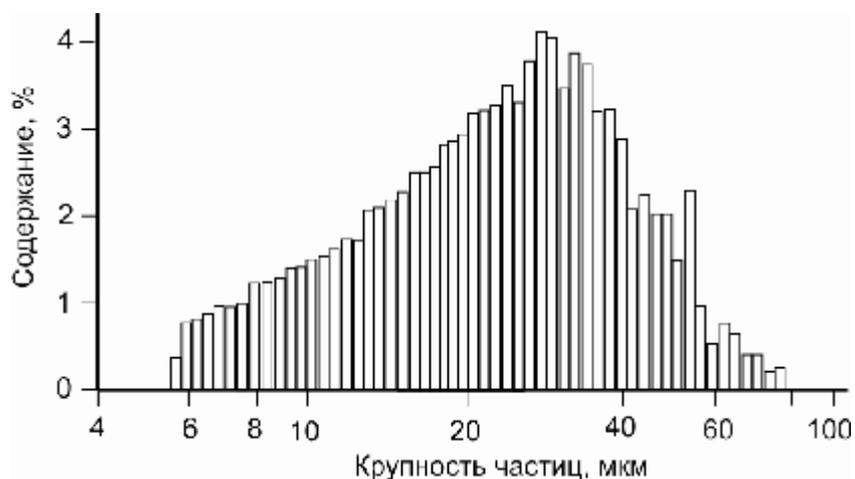


Рис. 3.1. Гистограмма распределения содержания фракций в известняке при $S_{\text{уд}}=2334 \text{ см}^2/\text{г}$, $D_{\text{ср}}=35\text{мкм}$



а

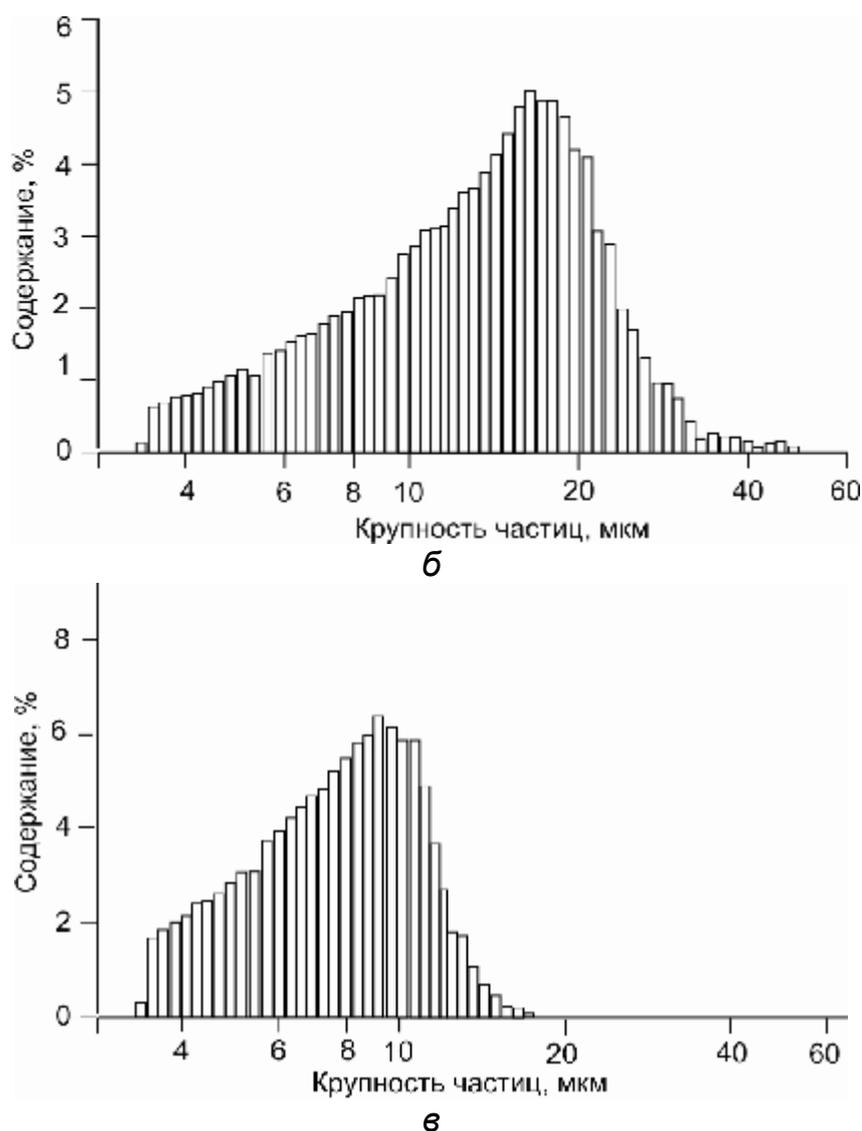


Рис. 3.2. Гистограммы распределения содержания фракций в доменном шлаке: а – при $S_{уд}= 2800 \text{ см}^2/\text{г}$, $D_{ср}=26 \text{ мкм}$; б – при $S_{уд}=4300 \text{ см}^2/\text{г}$, $D_{ср}=15 \text{ мкм}$; в – при $S_{уд}=6600 \text{ см}^2/\text{г}$, $D_{ср}=8 \text{ мкм}$

На рис. 3.1 показана гистограмма распределения содержания фракций молотого известняка, аналогичное распределение сохранится и для доменного шлака. С увеличением удельной поверхности шлака (рис. 3.2, а, б, в) распределение фракций описывается законом отрицательной симметрии, максимум гистограммы смещен в правую сторону и плотность частиц возрастает.

Агрегаты сверхтонкого измельчения сужают разброс фракций, тогда как при шаровом помоле встречаются фракции от 4 до 100 мкм. Плотность распределения тонкодисперсных частиц выполняет важную функцию в процессе гидратации вяжущих материалов, повышает реакционную способность и растворимость минералов.

Для достижения максимальной эффективности тонкого помола доменного шлака необходимо, чтобы измельчительный агрегат сокращал

разброс частиц. Характер распределения частиц в гистограммах позволяет утверждать, что увеличение удельной поверхности приводит к уменьшению диаметра частиц. Для полного использования вяжущих свойств доменного шлака в твердеющей смеси необходимо вовлекать как можно больше фракций размером 5 – 30 мкм, так как в этом пределе происходит полная гидратация частиц. Это достигается регулированием дисперсности конечного продукта в измельчительных агрегатах. При удельной поверхности шлака 2000 см²/г до 40 % частиц составляют более 30 мкм, следовательно, они находятся в инертном состоянии и не образуют новых соединений. Начиная с удельной поверхности 4300 см²/г практически все минералы шлака вступают в реакцию с молекулами воды и участвуют в формировании структуры, образуя прочные связи в закладочном массиве, так как содержание фракций менее 30 мкм составляет порядка 95 %.

Согласно полученным данным из гистограмм распределения классов фракций частиц шлака и отходов флюса установлена взаимосвязь между средним диаметром частиц D_{cp} и значением удельной поверхности $S_{уд}$, которая представлена на рис. 3.3. С помощью данного графика взаимосвязи можно прогнозировать средний диаметр частиц при известной удельной поверхности шлака.

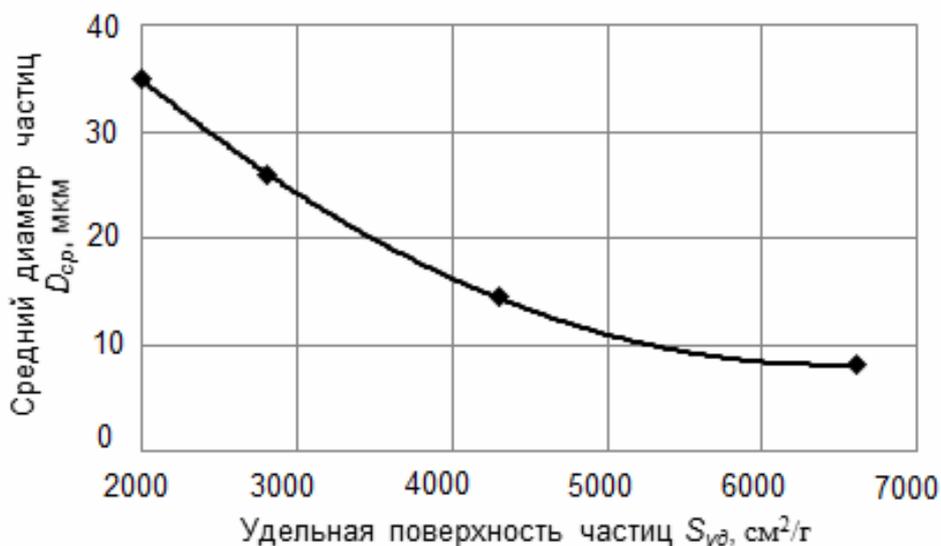


Рис. 3.3. График взаимосвязи среднего диаметра частиц доменного шлака и их удельной поверхности

Приведенный на рис. 3.3 график взаимосвязи среднего диаметра частиц доменного гранулированного шлака и его удельной поверхности выражается полиномиальной зависимостью и описывается эмпирическим уравнением вида $D = 10^{-6}S^2 - 0,02S + 64,3$ мкм, при $R^2 = 0,99$, где R – достоверность аппроксимации.

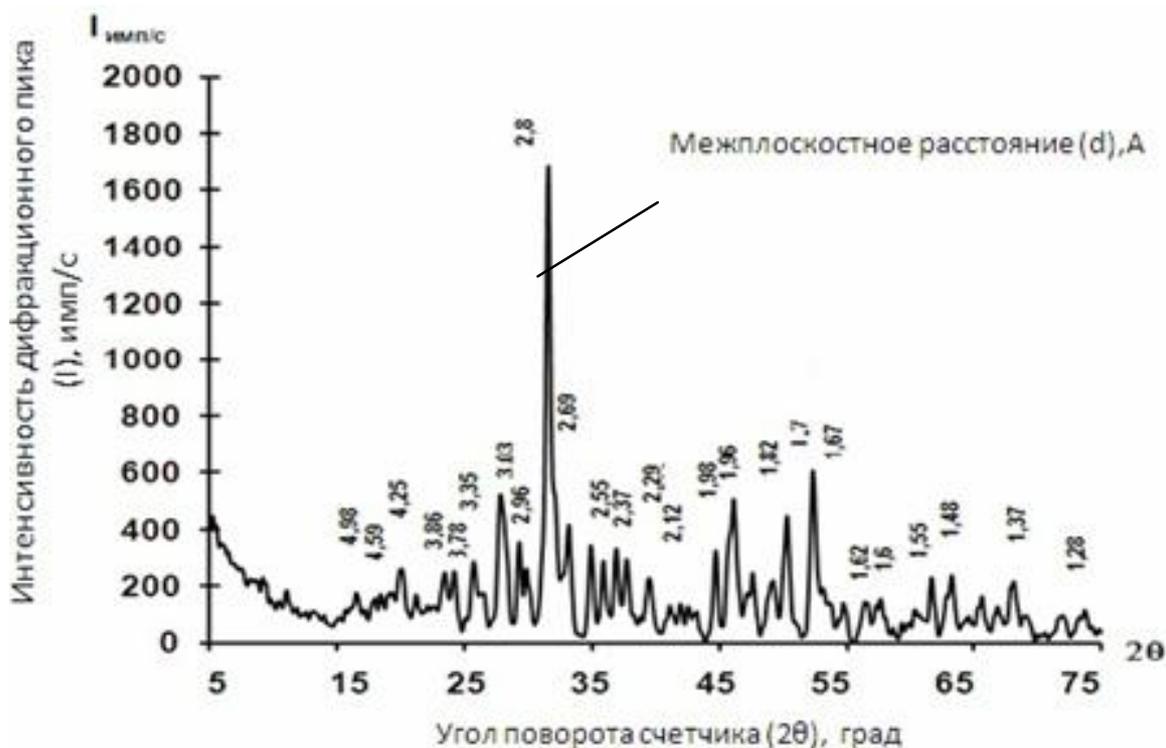
Шаровые мельницы обеспечивают выход среднего диаметра частиц 35 мкм, а при использовании агрегатов сверхтонкого измельчения появляется возможность достижения 10 мкм. Одним из главных критериев

выбора измельчительного оборудования является необходимым средний диаметр частиц конечного продукта. При этом малоизученными остаются вопросы проявления вяжущих свойств химических соединений шлака и отходов флюса с увеличением удельной поверхности. Изучение данного процесса возможно при комплексном физико-химическом исследовании.

Обработанный в струйной мельнице материал разной удельной поверхности будет использован в экспериментальных закладочных смесях с целью установления влияния на их свойства.

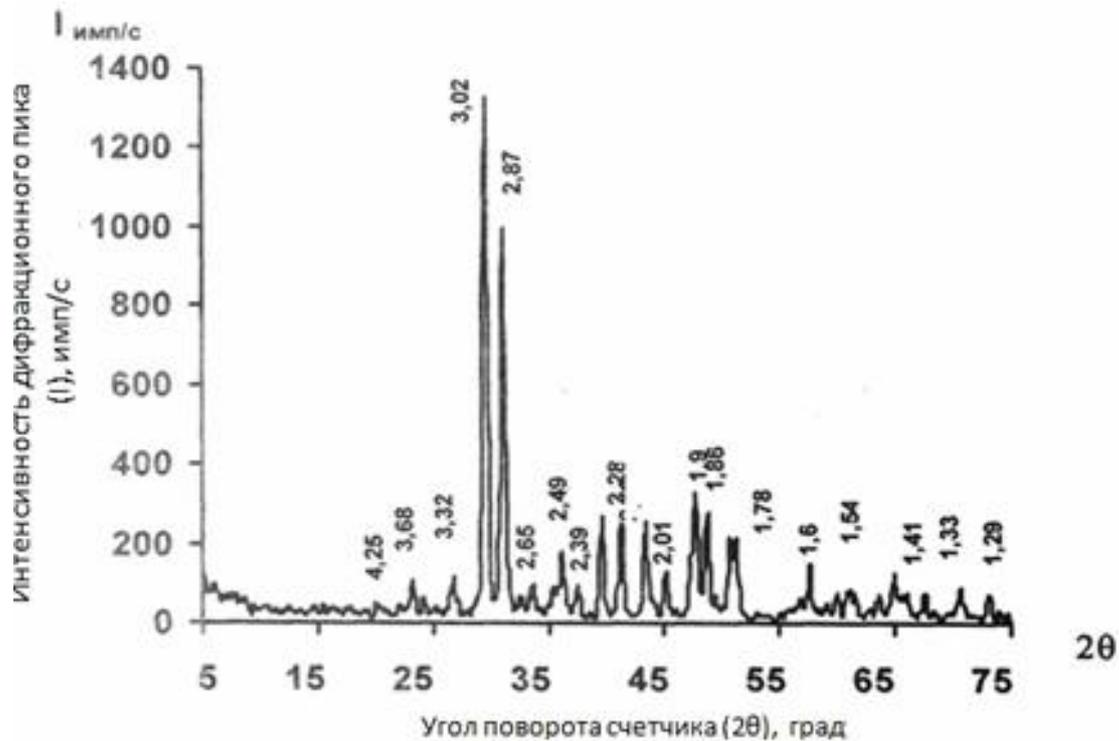
3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изучение механизма гидратации в твердеющей закладке и ее продуктов требует исследования химико-минералогического состава исходных компонентов закладки – доменного гранулированного шлака, флюсового известняка и кварц-хлорит-серицитовых пород для выявления активных минералов, способных повысить прочность монолитного массива. Комплексное исследование минерального состава закладочных материалов проводилось по методике, изложенной в разделе 2. Результаты рентгенофазового анализа минералов, входящих в состав закладочных материалов, приведены на рис. 3.4.

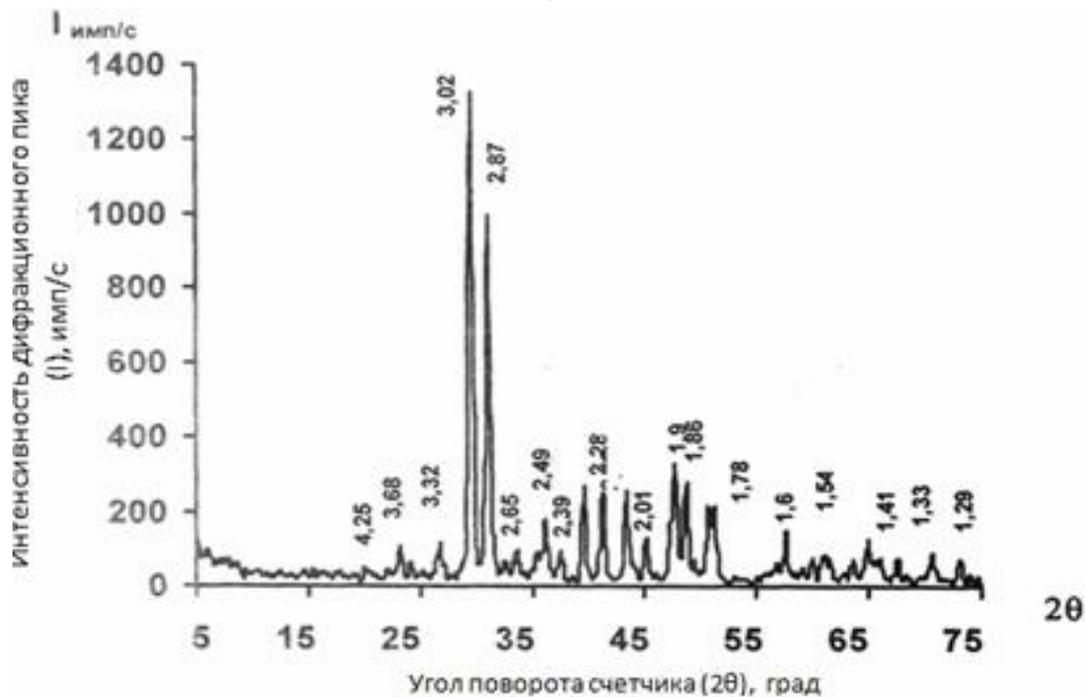


а

ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ



б



в

Рис. 3.4. Рентгенограммы закладочных материалов: доменный шлак (а); отходы флюса (б); горная порода (в)

В результате проведения исследований установлено, что доменный шлак (рис. 3.4, а) содержит мелилит, близкий по составу к окерманиту, и псевдоволластонит. На рентгенограмме мелилиту принадлежат дифракционные пики ($d/n=4,25; 3,03; 2,8; 2,29; 1,7; 1,67; 1,37$). Данный

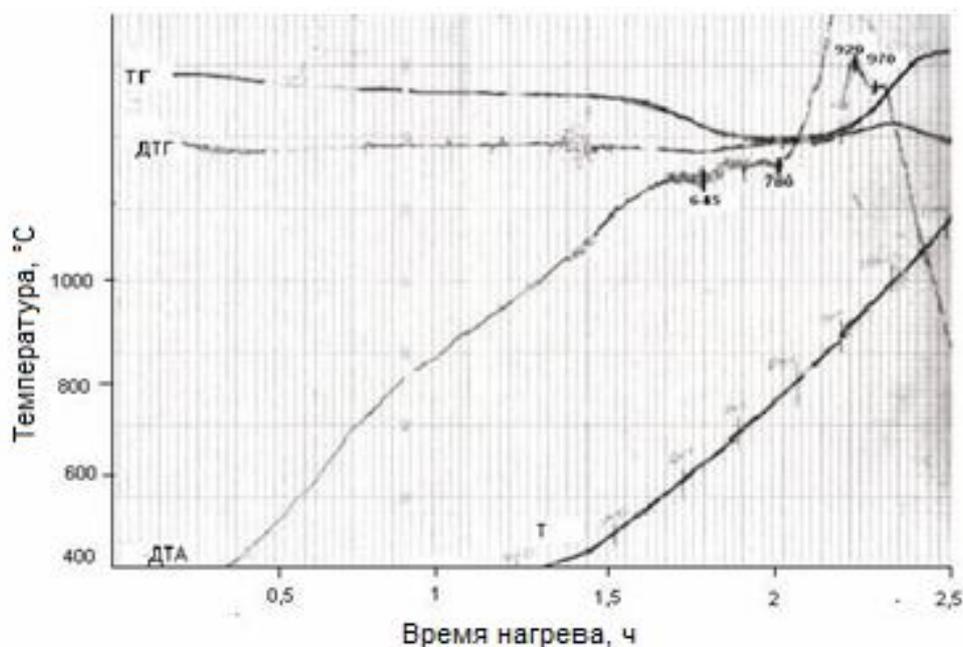
минерал представляет собой твердые расплавы минералов окерманита и геленита, поэтому встречаются мелилиты с переменным содержанием Al_2O_3 и MgO . Псевдоволластониту соответствуют основные дифракционные максимумы ($d/n=2,8$; 1,96; 1,82; 1,47). Превосходство интенсивности дифракционных максимумов мелилита над псевдоволластонитом свидетельствует о большем его содержании в доменном шлаке.

Результаты исследования отходы флюса (рис. 3.4, б) показали, что в нем содержится кальцит ($d/n=3,029$; 1,912; 2,28), доломит ($d/n=2,65$; 1,78; 1,54) и в качестве примеси – волластонит ($d/n=2,18$; 1,76; 1,92).

Исследования дробленных горных пород (рис. 3.4, в) показали, что в них преобладают минералы класса слюд, которые представлены биотитом ($d/n=3,32$; 2,33; 1,72), мусковитом ($d/n=3,32$; 1,94; 1,72), хлоритом ($d/n=7,01$; 2,12; 1,53) и гематитом ($d/n=2,43$; 1,35; 1,31).

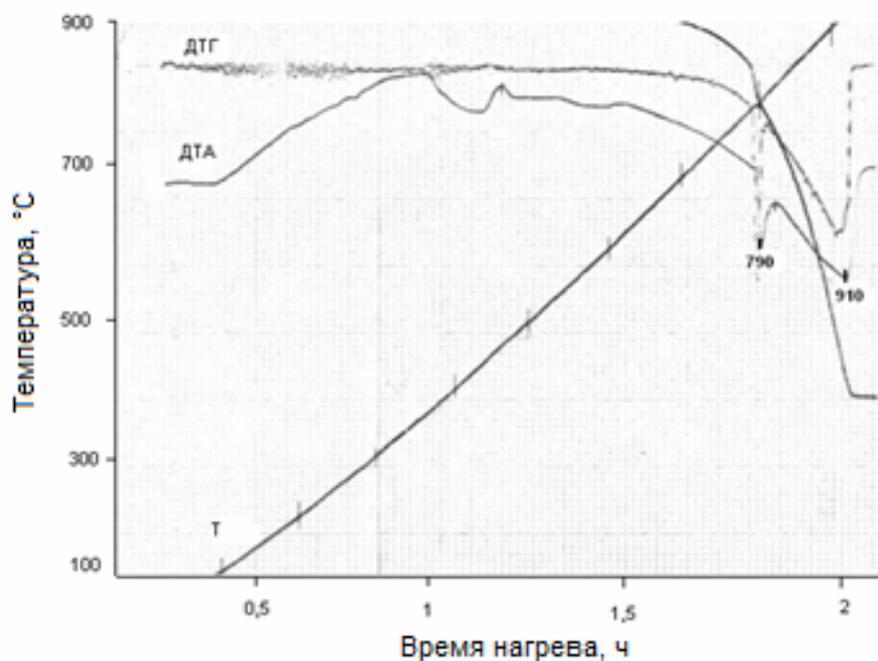
Для подтверждения установленного минерального состава компонентов закладки проведены также термические исследования, результаты которых представлены на рис. 3.5. Температура, °С

После проведения термического исследования доменного шлака (рис. 3.5, а) сделаны выводы, что при температуре 840 – 1000 °С кристаллизуется мелилит, что подтверждается экзоэффектом +920 °С. Ширина пиков мелилита указывает на его большее содержание в шлаке. При температуре +1125°С волластонит необратимо переходит в псевдоволластонит с незначительным изменением объема. Эндоэффекты при -645 и -780 °С соответствуют размягчению стеклофазы в доменном шлаке. При нагревании до 800 – 1100 °С происходит расстеклование шлака. Данные хорошо согласуются с исследованиями, приведенными в работе [102].

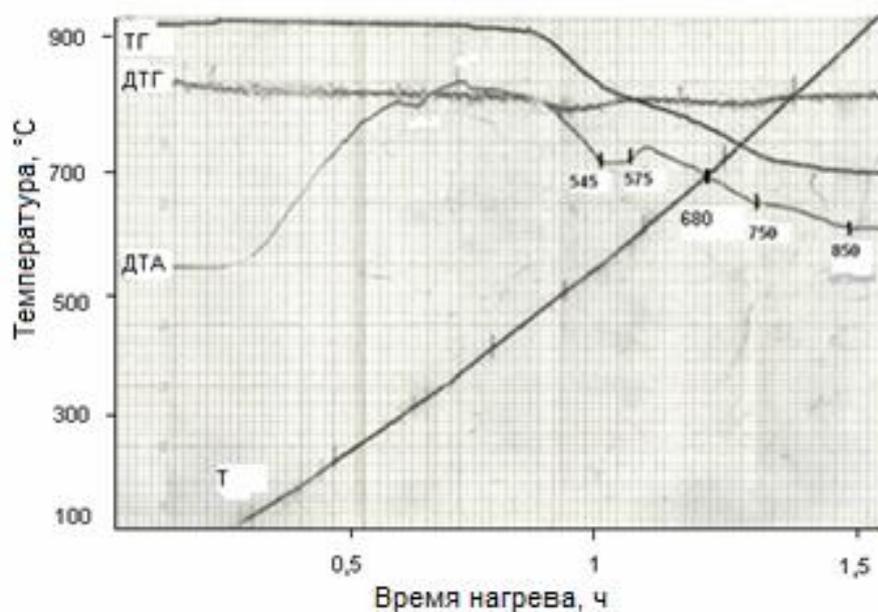


а

ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ



б



в

Рис. 3.5. Термограммы закладочных материалов: доменный шлак (а); отходы флюса (б); горная порода (в)

В результате проведенных термических исследований отходов флюса (рис. 3.5, б) установлены эндозффекты: -790 и -910 °С, что указывает на присутствие доломита и кальцита соответственно. При данной температуре происходит их разложение. Экзоэффект $+860$ °С соответствует примесям волластонита. Появление экзоэффектов в диапазоне $370 - 460$ °С связано с наличием примесей. Основными минералами отходов флюсового известняка являются карбонатные породы — кальцит и доломит. Содержание MgO в отходах флюсового известняка составляет около 2 %,

следовательно, преобладающим минералом и отходов флюсового известняка необходимо считать кальцит.

Согласно проведенным исследованиям (рис. 3.5, в) в горной породе содержатся в основном хлорит с эндоэффектами -545 и -575 °С, гематит – 680 °С, мусковит -750 °С, биотиту соответствует эндоэффект -1160 °С, который не попал в термограмму, так как накаливание проб осуществляли до температуры 1000 °С. Появление экзоэффектов в диапазоне $320 - 370$ °С связано с наличием незначительной доли различных слюдяных пород. Стоит отметить, что результаты рентгенофазовых и термических исследований минерального состава закладочных материалов хорошо согласуются.

После исследования компонентов закладки методом инфракрасной спектроскопии получены спектрограммы, представленные на рис. 3.6. Анализируя спектрограмму доменного шлака (рис. 3.6, а) установлено, что содержится мелилит с полосами поглощения 470 (деформационные колебания связи $Si-O-Si$); $858, 950, 980, 1020$ (валентные колебания $Si-O$ в диортогруппах Si_2O_7) cm^{-1} . Псевдоволластонит с рядом пиков в диапазоне $420 - 500$ (деформационные колебания связи $Si-O-Si$); $570 - 580$ (валентные колебания связи $Ca-O$); слабый пик 715 ; серия пиков $920 - 1110$ cm^{-1} (валентные колебания связи $Si-O$).

Отходы флюсового известняка по результатам спектроскопии (рис. 3.6, б) содержат кальцит, где четко выявлены характерные полосы поглощения $714, 874, 1418$ и 1803 cm^{-1} . Полосы поглощения с волновыми числами $725, 880, 1408$ (самая интенсивная полоса), $1440, 1825$ cm^{-1} принадлежат доломиту. В спектрах карбонатов наблюдается одиночный пик ($1400 - 1450$ cm^{-1}), соответствующий валентному колебанию иону CO_3 , также указывающий на наличие кальцита и доломита. В меньшем количестве присутствует волластонит со слабыми полосами поглощения $455, 570, 650, 680$ cm^{-1} .



а

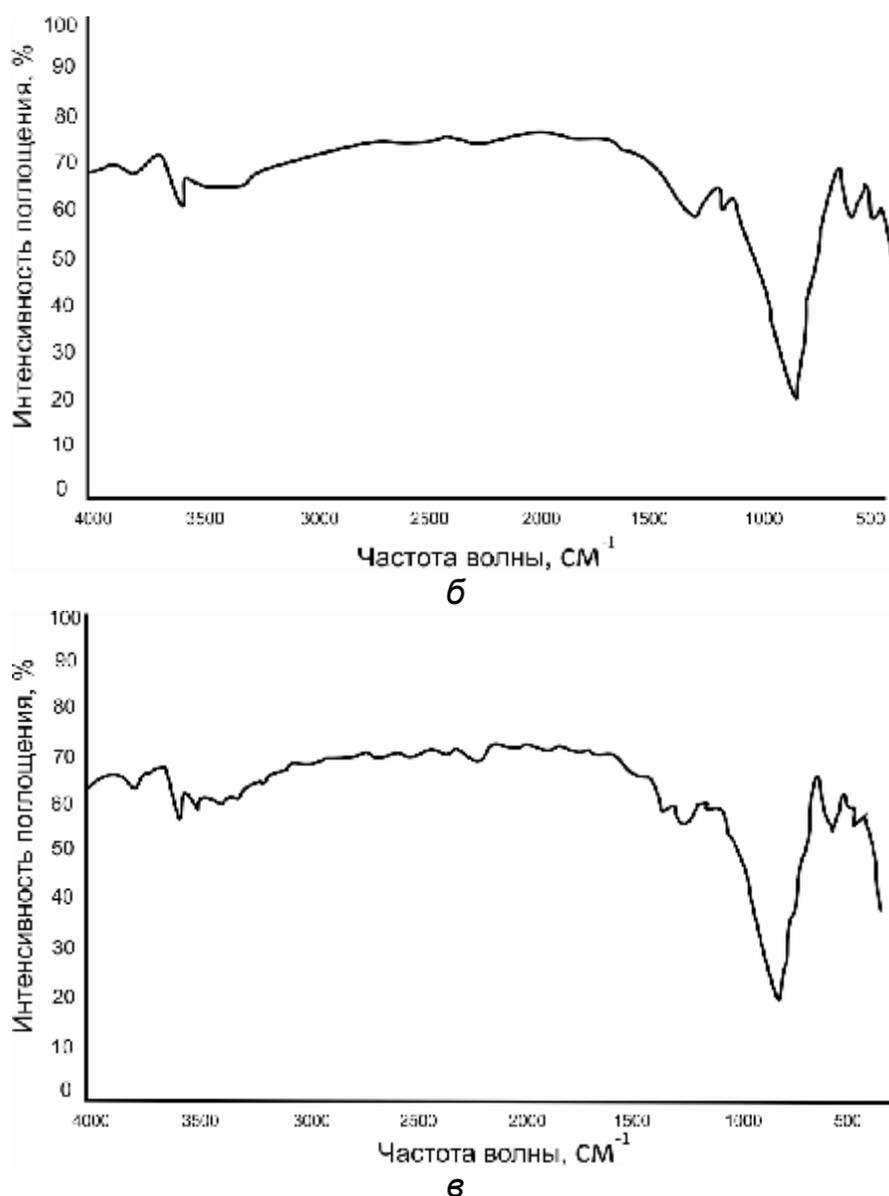


Рис. 3.6. Инфракрасные спектрограммы закладочных материалов: доменный шлак (а); отходы флюса (б); горная порода (в)

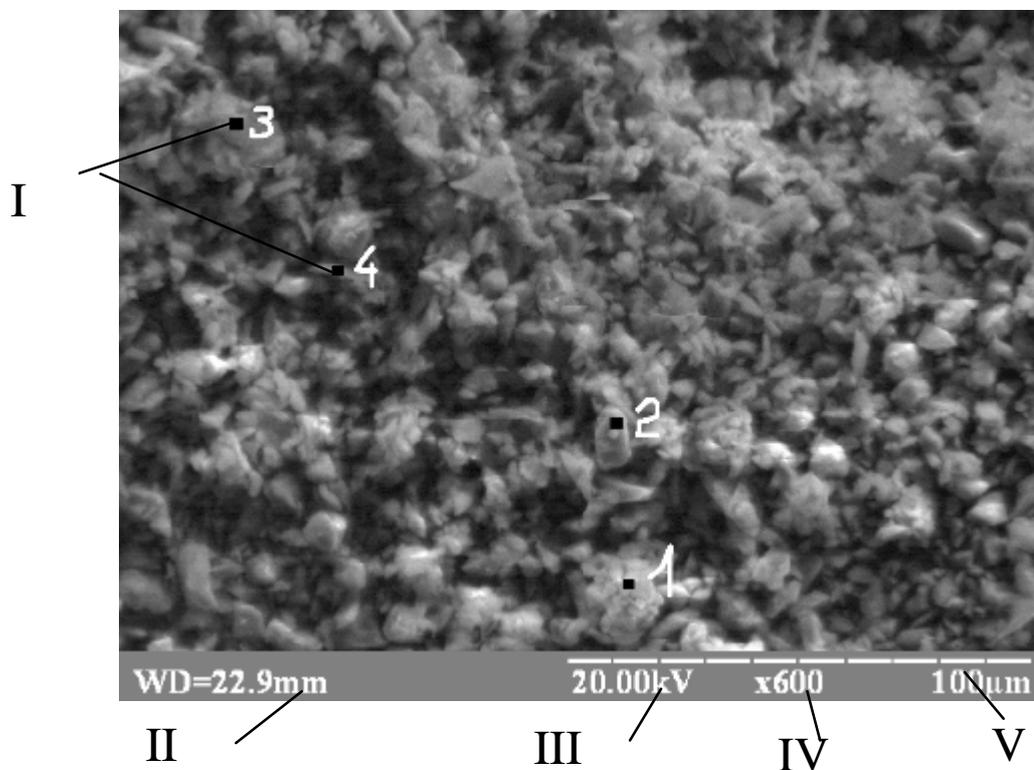
В горной породе (рис. 3.6, в) присутствует гематит со слабовыраженными полосами поглощения $450 - 470, 530 \text{ см}^{-1}$, мусковит с полосами поглощения $475 - 540; 750; 820; 920; 1030 - 1080; 3622 \text{ см}^{-1}$; биотит $460; 620; 700; 1010; 1620; 3650 \text{ см}^{-1}$; хлоритом $450; 670; 1010; 1450; 3600 \text{ см}^{-1}$. Появление ряда пиков в области длин волн 3600 см^{-1} свидетельствует о наличии кристаллизационной воды в структуре биотита, мусковита, хлорита.

На растровом электронном микроскопе РЕММА-102-02 получены микрофотографии частиц шлака, отходов флюса и горных пород, проведены замеры химического состава, что представлено на рис. 3.7. Данные полуколичественного микрорентгеноспектрального анализа замерных точек (на рис. 3.7) сведены в табл. 3.2.

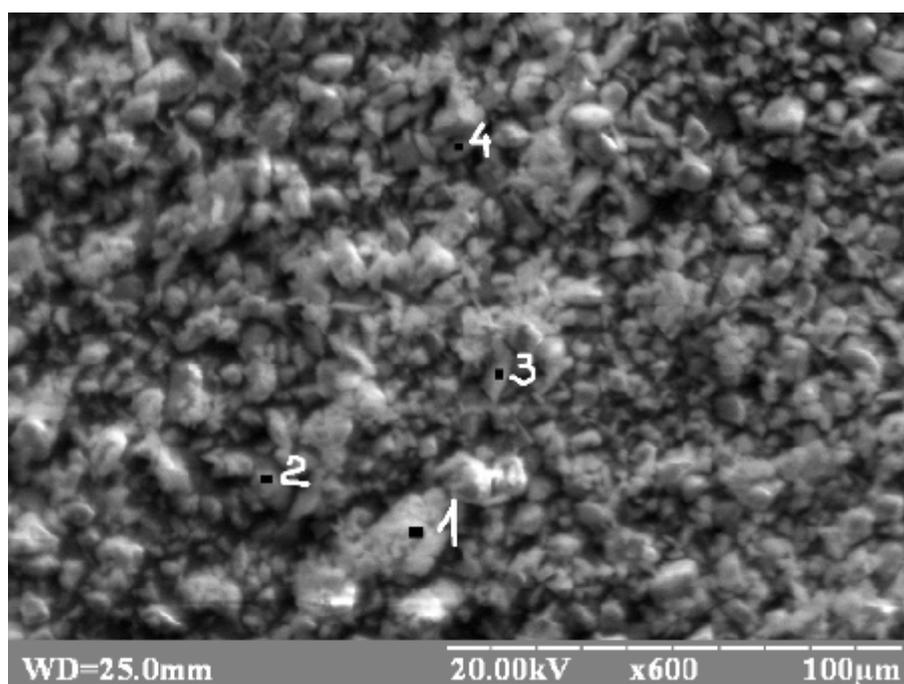
В результате комплексного исследования минерального состава с высокой степенью достоверности установлены основные минералы,

ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

входящие в состав компонентов твердеющей закладки: доменный шлак – мелилит, псевдоволластонит; отходы флюса – кальцит, доломит, горные породы – хлорит, гематит, мусковит, биотит.



a



б

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

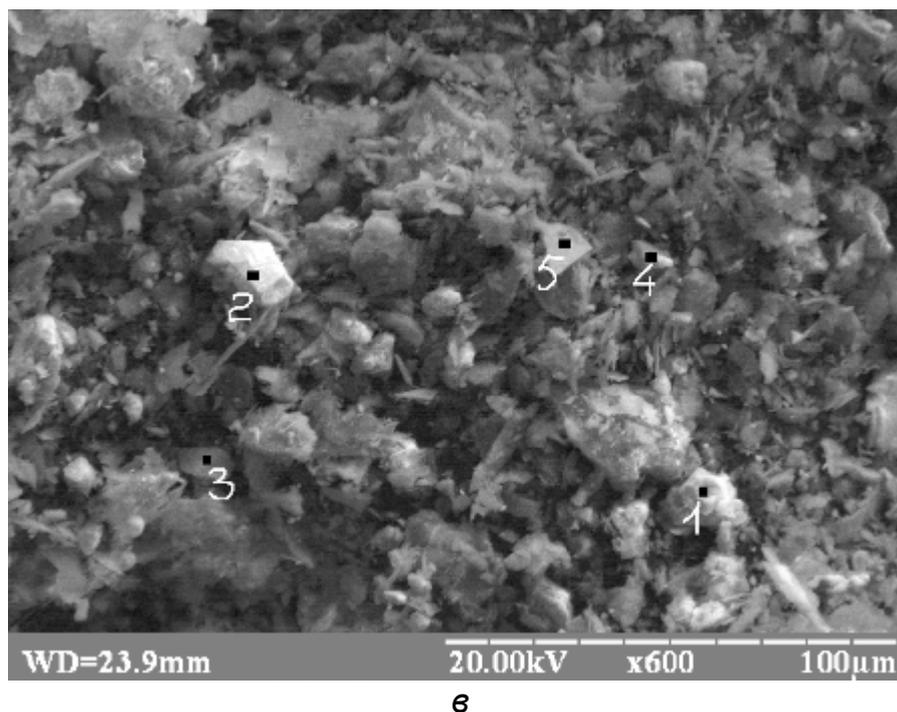


Рис. 3.7. Микрофотографии частиц закладочных материалов: доменный шлак (а); отходы флюса (б); горная порода (в); 1, 2, 3, 4, 5 – точки замеров химического состава; I – замеры химического состава; II - расстояние от объектива до поверхности образца; III – ускоряющее напряжение; IV – увеличение; V – масштабная линейка

Таблица 3.2

**РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОРЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗА ЗАКЛАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проба	Номер замера	Содержание основных оксидов, %						Минерал
		CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	
Отходы флюса	1	40,45	8,19	3,82	41,30	-	-	Волластонит
	2	51,25	3,50	37,56	4,71	-	-	Доломит
	3	84,24	3,52	4,15	4,43	-	-	Кальцит
	4	5,69	1,65	2,06	88,63	-	-	Кварц
Доменный гранулиров. шлак	1	46,65	4,76	5,79	37,21	-	-	Псевдоволластонит, мелилит
	2	67,25	4,14	2,67	19,46	-	-	
	3	39,94	8,39	4,94	38,41	-	-	
	4	36,19	8,69	5,01	37,40	-	-	
Горная порода	1	0,85	2,25	0,87	3,28	88,0	1,21	Гематит
	2	1,52	23,96	2,67	33,64	25,34	6,06	Биотит
	3	0,96	19,87	7,53	29,46	33,16	1,91	Хлорит
	4	0,73	6,14	23,64	56,71	6,19	1,40	Мусковит
	5	0,70	27,53	2,34	52,04	8,81	4,92	

Химико-минералогический анализ закладочных минералов позволяет установить значение минералов в процессе гидратации и структурообразования закладочного массива. Так, наибольшее значение в образовании монолитного камня принадлежит силикатам кальция –

мелилиту, псевдоволластониту и волластониту. Их гидратация при правильной пропорции и дисперсности приводит к росту прочных гидратных связей различной формы.

В естественных условиях мелилит и псевдоволластонит практически не гидратируются в течение длительного времени, что обуславливает прочность закладки в течение 3 месяцев 5 – 7 МПа против 30 – 40 у бетонов, где наиболее быстро гидратируются клинкерные минералы алит и белит.

Мелилит, близкий по составу к окерманиту, медленно гидратируется и в течение нескольких лет переходит в устойчивый гидросиликат кальция. Псевдоволластонит также подвергается медленной гидратации, образуя гелеобразную массу. Кальцит при тонком измельчении способен проявлять вяжущие свойства. Остальные минералы составляют скелет закладочного массива, являясь центрами роста новообразований в процессе гидратации. Одной из причин ослабления связей является наличие в составе закладки минералов слюд кварц-хлорит-серицитовых пород.

В результате выполненных исследований получены данные о минеральном и химическом составех компонентов закладки. Можно утверждать, что минералы шлака и отходов флюса при механоактивации способны проявлять вяжущие свойства.

Дальнейшее исследование структуры и прочности экспериментальных образцов твердеющей закладки даст возможность изучить кристаллические новообразования, которые формируются на основе активированных минералов: в большей степени доменного шлака и меньшей – отходов флюсового производства.

Для определения количества и пропорций добавляемых материалов (расход) в закладочную смесь необходимо провести лабораторные исследования параметров закладочных смесей (соотношение компонентов, прочность, показатели подвижности, напряжения сдвига и схватывания смеси при высоких значениях расхода и удельной поверхности). Важнейшим параметром является прочность закладочного массива.

3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Применяемая на Запорожском железорудном комбинате в составе твердеющей закладки величина помола доменного гранулированного шлака 55 % крупностью -0,074 мм не способствует условиям роста прочных связей гидросиликатов кальция в структуре закладки к моменту обнажения закладочного массива и, как следствие, формированию требуемой прочности, что часто наблюдается при высоком расходе шлака. Это обусловлено тем, что структура в этом случае представлена в форме геля. Поэтому были испытаны закладочные смеси с меньшим расходом и большей удельной поверхностью частиц шлака с добавлением в смесь

части молотых флюсовых отходов с дисперсностью, аналогичной доменному гранулированному шлаку.

Для установления возможности замены части доменного шлака флюсовыми отходами в составе закладочной смеси, необходимо исследовать их влияние на прочность закладки. В связи с этим в лаборатории закладочного комплекса были приготовлены составы с заменой части молотого доменного шлака на молотые отходы флюсового известняка в количестве от 25 до 80 %. Молотый известняк заменяет часть основного вяжущего материала – доменный гранулированный шлак и выступает в качестве микронаполнителя. На рис. 3.8 приведена зависимость прочности закладки от содержания молотого известняка в составе вяжущего материала.

Установлено, что прочность закладки возрастает при добавлении молотых флюсовых отходов до 50 %, при большем содержании наблюдается снижение прочности твердеющей закладки. Следовательно, замена известняка на шлак возможна при его содержании не более 50 %. Прочность закладки зависит от количества молотых флюсовых отходов описывается полиномиальной зависимостью и аппроксимируется эмпирическим уравнением вида $\sigma = 3 \cdot 10^{-5} Q^3 - 0,005 Q^2 + 0,31 Q - 0,87$, при $R^2 = 0,72$.

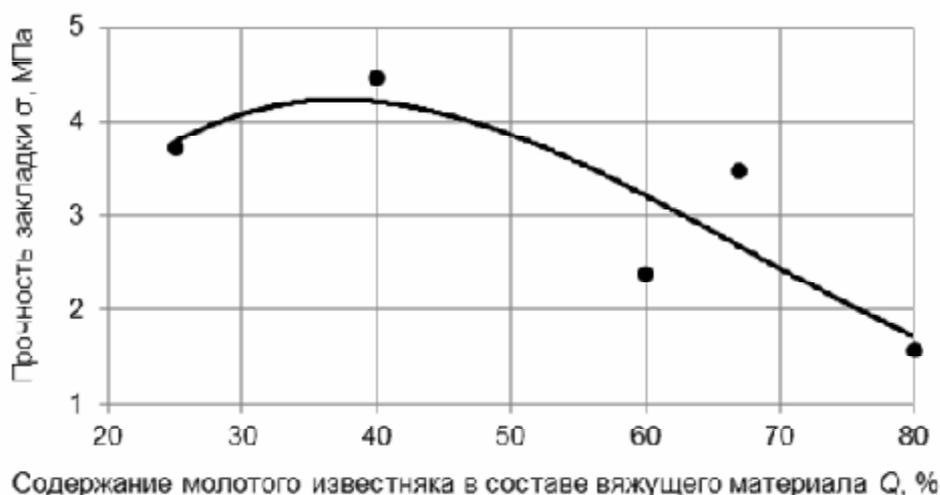


Рис. 3.8. Зависимость прочности закладки от содержания молотых флюсовых отходов в составе вяжущего материала

Составы закладочной смеси проектировались таким образом, чтобы определить рациональное соотношение расхода и удельной поверхности частиц вяжущих материалов при требуемой прочности. Оптимальным считается такое соотношение расхода и удельной поверхности, при котором сохраняются технологические свойства смесей и достигается требуемая прочность при минимальных затратах.

За основу взят компонентный состав твердеющей закладки, предложенный сотрудниками НИГРИ (кг/м^3): шлак – 400 – 500, отходы флюсового известняка – 1100, порода – 370 – 400, вода – 400. Составы подобраны пропорционально общей твердой массе всех компонентов с уменьшенным расходом доменного шлака для установления возможности его снижения. Исследования проводились по методике, изложенной в разделе 2.

Для исследования влияния удельной поверхности на подвижность закладочной смеси были отобраны закладочные смеси с расходом шлака 300 кг/м^3 при одинаковом расходе воды на затворение 400 л/м^3 . Зависимость подвижности смеси от удельной поверхности частиц измельченных фракций шлака и отходов флюса приведена на рис. 3.9.

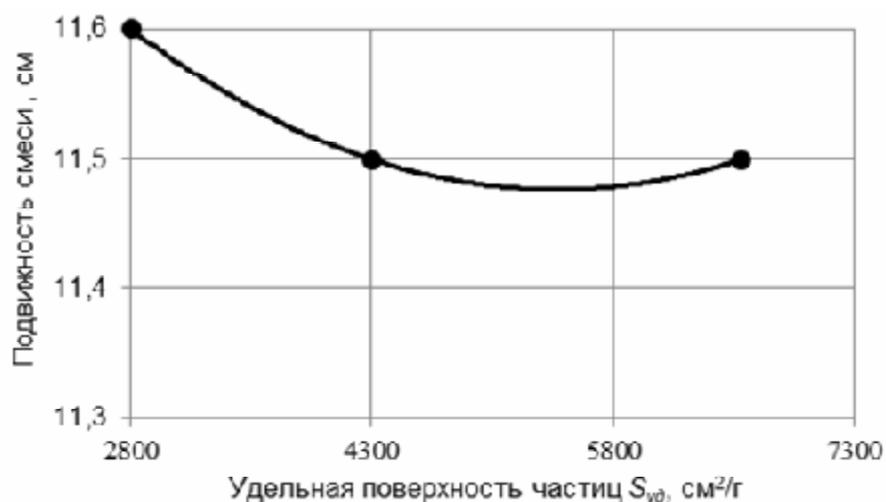


Рис. 3.9. Зависимость подвижности смеси от удельной поверхности при расходе измельченных шлака и отходов флюса в смеси 300 и 150 кг/м^3

Согласно зависимости, приведенной на рис. 3.9, увеличение удельной поверхности приводит к незначительному снижению подвижности смеси на $0,1$ см. Подвижность закладочной смеси выдерживалась в пределах 10 – 12 см для обеспечения ее транспортабельности. Характер изменения напряжения сдвига смеси от удельной поверхности представлена на рис. 3.9.

Приведенный график на рис. 3.10 показывает незначительное увеличение сопротивляемости смеси движению в трубопроводе при составах твердеющей закладки с расходом 200 и 300 кг/м^3 , однако по требованиям этот показатель должен составлять не более $1,96 \text{ МПа}$, что удовлетворяет требованиям технологии транспортирования. Небольшие колебания в показателях напряжения сдвига связаны с тем, что подвижность смесей в лабораторных условиях доводили до пределов 10 – 12 см, поэтому имеют место колебания расхода воды.

Незначительное повышение напряжения сдвига связано с тем, что с увеличением доли тонких фракций структура закладочной смеси становится

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

более плотной, все частицы движутся упорядочено и связано. Износ трубопровода уменьшится, так как крупные фракции обволакиваются водяной пленкой из мелких частиц (коагуляционная структура), обеспечивая хорошую пластичность.

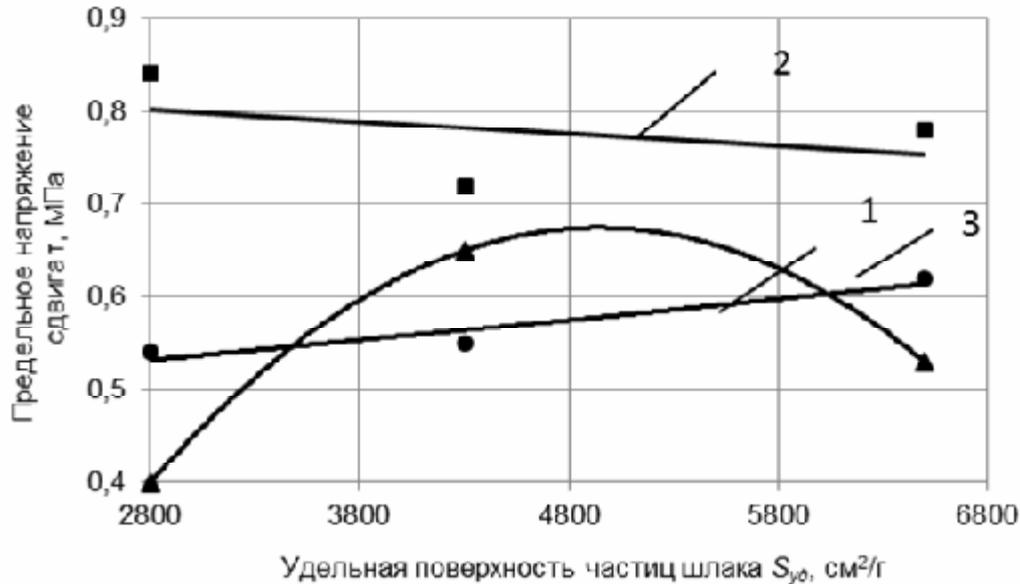


Рис. 3.10. Зависимость величины напряжения сдвига смеси от удельной поверхности шлака и отходов флюса при их расходе 300 (1); 200 (2); 100 кг/м³ (3)

В табл. 3.3 приведены результаты исследования основных параметров экспериментальных закладочных смесей.

Таблица 3.3

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Шифр состава закладочной смеси	Расход компонентов, кг/м ³					Плотность смеси, кг/м ³	Удельная поверхность, см ² /г	Время перемешивания компонентов, мин	Подвижность смеси, см	Предельное напряжение сдвига, МПа
	Доменный гранулированный шлак	Отходы флюсового		Дробленая порода	Вода					
		измельч.	крупные							
И1	100	50	1150	512	400	2212	2000	10	10,5	0,93
И2	200	100	1050	462	400	2212	2000	10	11,0	0,81
И3	300	150	950	412	400	2212	2000	10	11,2	1,05
И4	100	50	1150	512	400	2212	2800	10	11,1	0,55
И5	200	100	1050	462	400	2212	2800	10	10,9	0,86
И6	300	150	950	412	400	2212	2800	10	11,6	0,41
И7	100	50	1150	512	400	2212	4300	10	11,3	0,56
И8	200	100	1050	462	400	2212	4300	10	11,5	0,74
И9	300	150	950	412	400	2212	4300	10	11,5	0,66
И10	100	50	1150	512	400	2212	6600	10	11,5	0,63
И11	200	100	1050	462	400	2212	6600	10	11	0,79
И12	300	150	950	412	400	2212	6600	10	11,5	0,54

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Средние показатели напряжения сдвига не превышают 0,95 МПа, а подвижность составляет 10 – 12 см, время схватывания – 12 – 15 ч. При максимальной удельной поверхности 6600 см²/г время схватывания состава твердеющей закладки составило 12 ч. Полагаем, что при данных параметрах (напряжение сдвига, подвижность, скорость схватывания) закладочные смеси будут отвечать требованиям транспортирования и укладки в выработанное пространство.

По истечении 30 и 90 дней образцы экспериментальных закладочных смесей были испытаны с помощью гидравлического пресса ПСУ-100 на одноосное сжатие. На рис. 3.11 приведены фотографии испытания прочности на сжатие образцов твердеющей закладки. По рисунку можно наблюдать, что при потере прочности происходит боковое отслоение массы закладки и ее разрушение.



Рис. 3.11. Испытания образцов твердеющей закладки

В табл. 3.4 представлены результаты испытания образцов твердеющей закладки на прочность, а закономерности изменения прочности от площади удельной поверхности приведены на рис. 3.12.

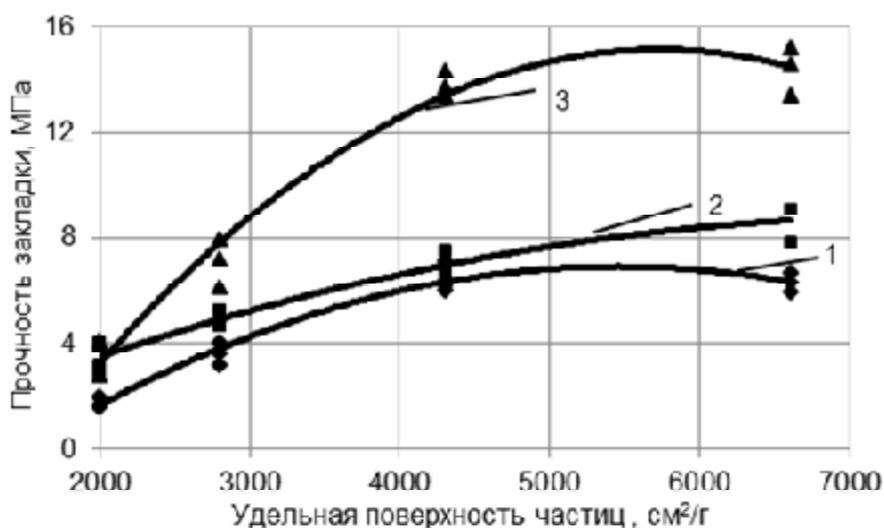


Рис. 3.12. Зависимость прочности закладки от удельной поверхности шлака и отходов флюса в возрасте 30 дней: при их расходе 100 и 50 (1); 200 и 100 (2); 300 и 150 кг/м³ (3)

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Таблица 3.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Шифр состава закладочной смеси	Размеры сторон кубического образца, см		S, см ²	F, Н	P, МПа	P _{ср} , МПа	
						30 дней	90 дней
И1	9,9	10	99	1,96·10 ⁵	1,98	1,77	4,5
	9,5	10,1	95,95	1,56·10 ⁵	1,63		
	9,8	10	98	1,66·10 ⁵	1,70		
И2	9,7	10,1	97,97	3,97·10 ⁵	4,05	3,40	5,9
	9,9	10	99	3,18·10 ⁵	3,21		
	9,9	10,2	100,98	2,99·10 ⁵	2,96		
И3	9,8	10	98	4,03·10 ⁵	4,10	3,63	6,1
	10	10	100	4,03·10 ⁵	4,00		
	10	9,9	99	2,77·10 ⁵	2,80		
И4	10	10	100	3,60·10 ⁵	3,60	3,63	6,17
	9,8	9,8	96,04	3,92·10 ⁵	4,08		
	10	9,8	98	3,13·10 ⁵	3,20		
И5	10	9,9	99	5,19·10 ⁵	5,24	5,08	7,05
	10	10,2	102	5,39·10 ⁵	5,28		
	10,1	10,1	102,01	4,8·10 ⁵	4,71		
И6	9,5	10	95	6,86·10 ⁵	7,22	7,10	9,65
	9,5	10	95	7,55·10 ⁵	7,94		
	9,6	10	96	5,88·10 ⁵	6,12		
И7	9,8	10	98	6,96·10 ⁵	7,10	6,43	8,04
	10	10	100	5,98·10 ⁵	6,00		
	10	10,3	103	6,37·10 ⁵	6,20		
И8	10	10	100	6,76·10 ⁵	6,76	6,85	8,9
	10	9,9	99	6,27·10 ⁵	6,33		
	10	9,7	97	7,25·10 ⁵	7,48		
И9	9,5	10	95	1,26·10 ⁶	13,38	13,80	17,39
	10	10	10	1,43·10 ⁶	14,31		
	9,8	10	98	1,34·10 ⁶	13,70		
И10	10	10	100	5,94·10 ⁵	5,94	6,31	10,6
	9,9	10	99	6,27·10 ⁵	6,33		
	10	10	100	6,66·10 ⁵	6,66		
И11	10	10,1	101	9,16·10 ⁵	9,07	8,61	11
	10	10,1	101	9,16·10 ⁵	9,07		
	10,1	10,2	103,02	8,04·10 ⁵	7,80		
И12	10	10	100	1,52·10 ⁶	15,20	14,75	23,6
	10,2	10,4	106,08	1,42·10 ⁶	13,39		
	10	10	100	1,46·10 ⁶	14,61		

Получены уравнения регрессий зависимостей прочности закладки σ (МПа) от величины удельной поверхности шлака и отходов флюса S (см²/г) при различном их расходе (рис. 3.12):

– При 100 и 50 кг/м³

$$\sigma = -4 \cdot 10^{-7} S^2 + 0,004S - 6,16, \text{ МПа при } R^2 = 0,96;$$

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

– При 200 и 100 кг/м³

$$\sigma = -2 \cdot 10^{-7} S^2 + 0,002S - 0,95, \text{ МПа при } R^2 = 0,94;$$

– При 300 и 150 кг/м³

$$\sigma = -9 \cdot 10^{-7} S^2 + 0,009S - 12,91, \text{ МПа при } R^2 = 0,97$$

Достоверность полученных результатов зависит от точности и определяется необходимым количеством измерений. В нашем случае проводим измерение прочности $n = 3$ образцов твердеющей закладки каждого состава при условии, что коэффициент вариации не более 20 %. Проверка достоверности полученных результатов представлена в табл. 3.5.

Анализ данных табл. 3.5 показывает, что в приведенных составах закладочных смесей коэффициент вариации прочности не превышает 20 %, следовательно, результаты считаем представительными и достоверными.

Следует отметить, что высокие показатели прочности наблюдаются уже с течением 30 дней твердения. Время твердения закладки, через которое приступают к отработке рудных целиков (камер второй очереди), составляет 90 дней. Из этого следует, что появляется возможность начать отработку камеры второй очереди уже спустя 30 дней твердения. Это позволит интенсифицировать добычу руды в этаже.

Таблица 3.5

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Шифр состава закладочной смеси	X_{cp} , МПа	σ , МПа	V , %	ϵ , %
И 1	1,77	0,30	8,47	11,05
И 2	3,40	0,57	13,50	9,59
И 3	3,63	0,63	16,20	9,88
И 4	3,63	0,35	9,64	5,63
И 5	5,08	0,26	5,11	2,98
И 6	7,10	0,74	10,42	6,09
И 7	6,43	0,48	13,20	7,72
И 8	6,85	0,47	6,86	4,01
И 9	13,8	0,38	2,75	1,60
И 10	6,31	0,29	4,60	2,69
И 11	8,61	0,60	6,96	4,07
И 12	14,4	0,75	5,20	3,04

Приведенные графики рис. 3.12 показывают, что увеличение удельной поверхности оказывает упрочняющий эффект на искусственный массив. Интенсивный прирост прочности происходит в диапазоне удельной поверхности 2000 – 5500 см²/г. Зависимости позволяют выбирать состав твердеющей закладки при необходимой прочности. Так, для создания закладочного массива прочностью 8 МПа достаточно в 1 м³ закладочной смеси добавлять измельченных 180 кг шлака и 90 кг отходов флюса с

удельной поверхностью $S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$ либо 220 кг шлака и 110 кг известняка с удельной поверхностью $S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$. Остальная часть материала (при установленном расходе шлака $400 \text{ кг}/\text{м}^3$ закладки) распределяется по весу на известняк флюсовый и горную породу. Критерием выбора состава закладки будет являться экономичность.

Согласно полученным зависимостям прирост прочности в твердеющей закладке достигает величины удельной поверхности $5000 - 5500 \text{ см}^2/\text{г}$. При показателе удельной поверхности $5500 \text{ см}^2/\text{г}$ очевидно происходит формирование окончательной структуры твердеющей закладки. В процессе последующего измельчения прочность возрастать не будет. Время схватывания закладочной смеси при указанной удельной поверхности будет отвечать условиям транспортирования.

Покажем зависимость прочности твердеющей закладки из табл. 3.4 от расхода доменного шлака и отходов флюса при их разной удельной поверхности частиц на графике, представленном на рис. 3.13.

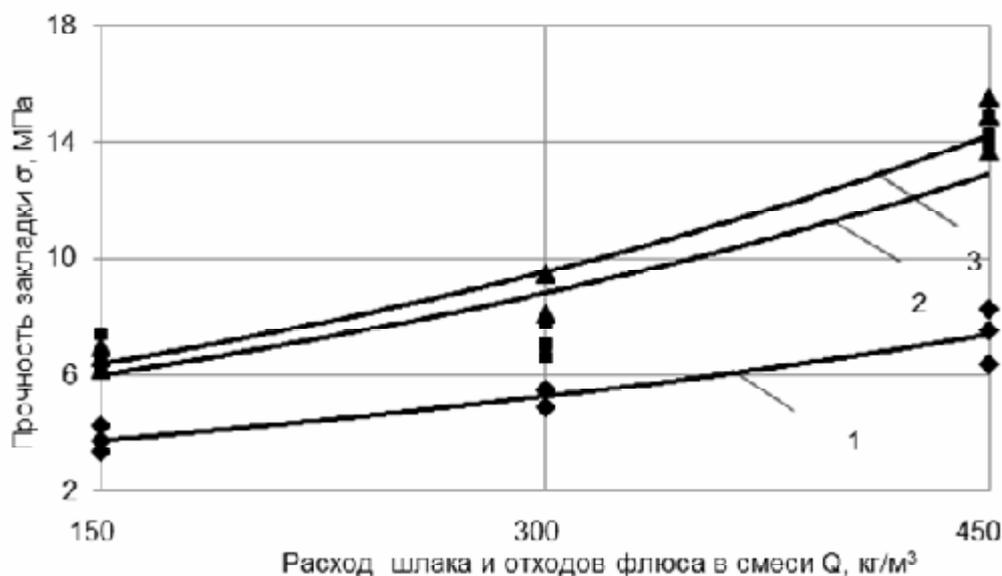


Рис. 3.13. Зависимость прочности закладки от расхода шлака и отходов флюса при разной удельной поверхности частиц $S_{y\partial}$, $\text{см}^2/\text{г}$: 2800 (1); 4300 (2); 6600 (3)

Получены уравнения зависимостей прочности закладки σ (МПа) от расхода доменного шлака Q ($\text{кг}/\text{м}^3$) в смеси при различной его удельной поверхности S ($\text{см}^2/\text{г}$):

- при $S_{y\partial}=2800 \text{ см}^2/\text{г}$ $\sigma = 2,69e^{0,0034Q}$, $R^2 = 0,90$;
- при $S_{y\partial}=4300 \text{ см}^2/\text{г}$ $\sigma = 4,08e^{0,0038Q}$, $R^2 = 0,79$;
- при $S_{y\partial}=6600 \text{ см}^2/\text{г}$ $\sigma = 4,25e^{0,004Q}$, $R^2 = 0,95$.

Анализ зависимостей рис. 3.13 показывает, что при расходе в закладочной смеси $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ доменного шлака твердеющая система

достигает максимума прочности, однако при величине расхода 100 кг/м^3 с удельной поверхностью 4300 и $6600 \text{ см}^2/\text{г}$ сохраняется прочность, соответствующая нормативной, так как минералы вяжущего сильно активированы. Из этого следует, что с увеличением расхода шлака и отходов флюса Q прочность закладки возрастает по экспоненциальной зависимости вида $y = e^x$. Стоит отметить, что при высоких значениях удельной поверхности $4300 - 6600 \text{ см}^2/\text{г}$ можно получать высокую прочность закладочного массива, несмотря на величину расхода доменного шлака и отходов флюса Q . Можно сделать вывод, что расход вяжущего материала оказывает менее существенное влияние на прочность закладки по сравнению с величиной удельной поверхности частиц, значение которой в формировании структуры и прочности закладочного массива несравненно больше. Полученные научные результаты позволяют определить оптимальное соотношение расхода вяжущего материала и его удельной поверхности.

Закономерность роста прочности закладки во времени имеет значение при определении минимального срока начала отработки целиков, влияет на выбор параметров систем разработки [103]. Результаты исследования прочности от времени твердения составов закладочной смеси с удельной поверхностью 2800 и $4300 \text{ см}^2/\text{г}$ приведены на рис. 3.14.

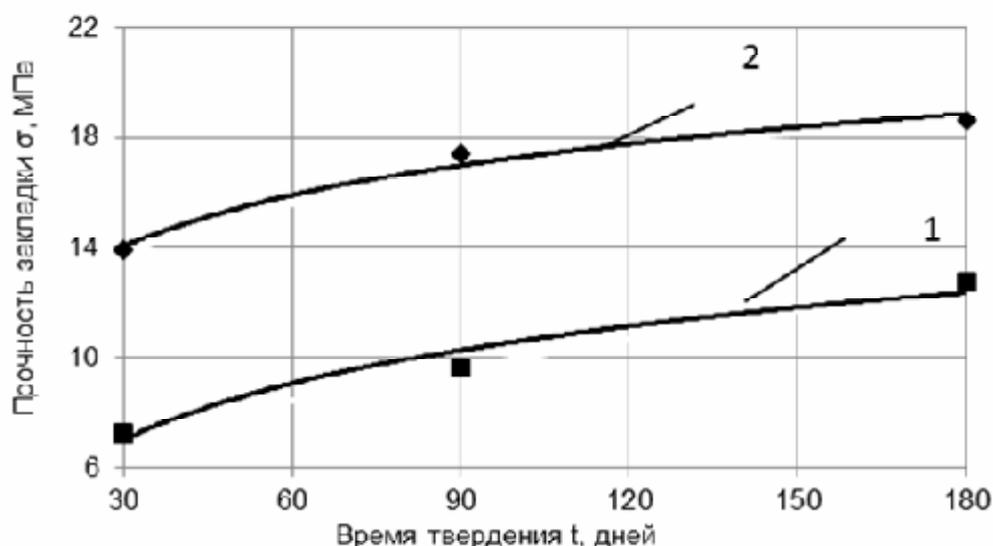


Рис.3.14. Зависимость прочности закладки от времени твердения: 1, 2 – при расходе измельченного шлака 300 кг/м^3 и отходов флюса 150 кг/м^3 и $S_{уд}$, равной 2800 и $4300 \text{ см}^2/\text{г}$ соответственно

Из графиков (рис. 3.14) видно, что прочность закладки изменяется по логарифмической зависимости от времени твердения. При этом снижений прочности не наблюдается. Приведенные в рис. 3.14 составы могут использоваться для возведения закладочных массивов при отработке

запасов руд на глубоких горизонтах, в местах, где требуется быстрый набор прочности.

При выемке рудного массива необходимо стремиться к заполнению выработанного пространства материалом, наиболее приближенным к объемному весу руды. В настоящее время объемный вес закладки при заполнении выработанного пространства составляет $2,2 - 2,4 \text{ т/м}^3$. Важной характеристикой при приготовлении твердеющей закладки на основе мелкодисперсных фракций доменного шлака и отходов флюса является ее объемный вес. Необходимо, чтобы этот параметр находился в пределах, применяемых на практике. Проведены исследования плотности экспериментальных составов, распределение объемного веса от удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса представлено на рис. 3.15, а изменение объемного веса закладки во времени – на рис. 3.16.

Анализ графиков 3.15, 3.16 позволяет сделать вывод о том, что значительных изменений объемного веса закладки от показателей, применяемых в практике закладочных работ, не наблюдается. Объемная масса закладки находится в допустимом пределе $2,3 - 2,5 \text{ т/м}^3$.

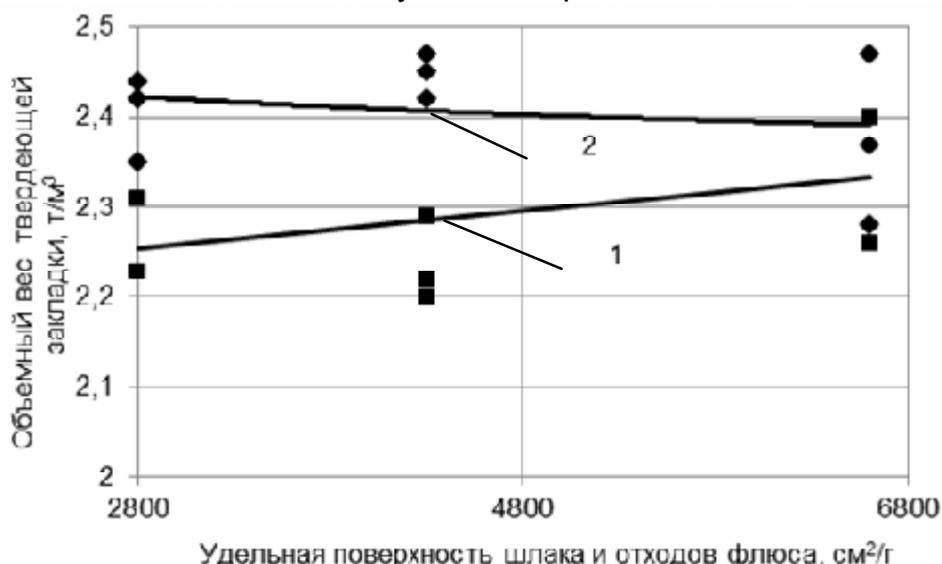


Рис. 3.15. Зависимость объемного веса закладки от удельной поверхности частиц: 1 – при составах с расходом измельченных шлака и отходов флюса 300 и 150 кг/м^3 ; 2 – при составах с расходом измельченных шлака и отходов флюса 100 и 50 кг/м^3

С возрастом происходит медленное повышение объемного веса, связанного с ростом и кристаллизацией химических образований внутри закладочного массива, продолжающееся несколько лет. Закладочные составы с расходом 100 кг/м^3 (рис. 3.16) характеризуются большим значением объемной массы из-за доли инертных материалов в смеси (порода, известняк), вес частиц которых превосходит вес новообразованных веществ в составах закладочных смесей при расходе шлака 300 кг/м^3 .

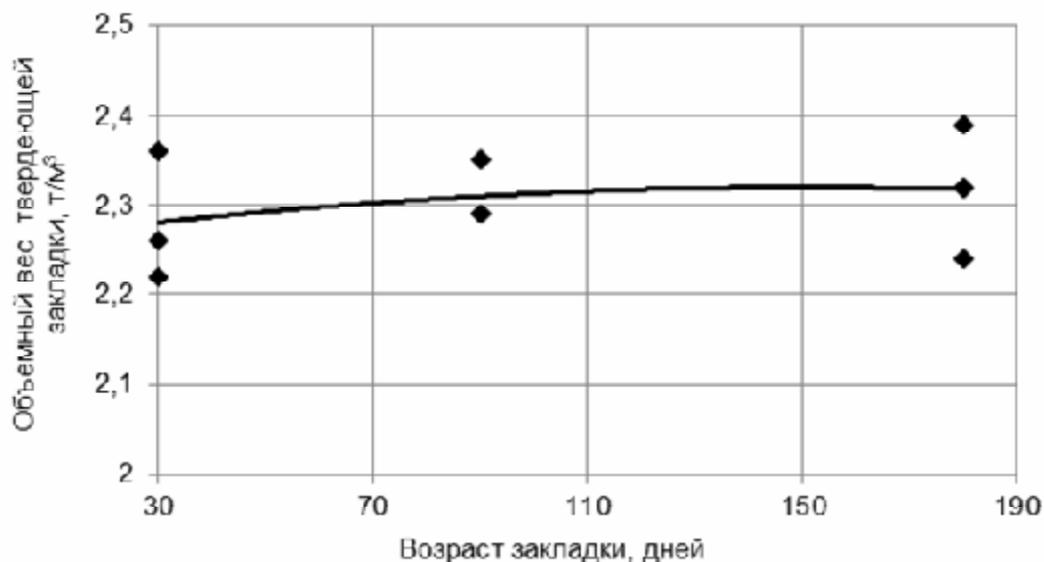


Рис. 3.16. Зависимость объемного веса закладки от ее возраста с расходом измельченного шлака 300 кг/м^3 и отходов флюса 150 кг/м^3 при их удельной поверхности $S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$

Анализ исследований показывает, что снижая расход вяжущего не менее чем в 2 раза достигаются нормативное значение прочности закладки, что подтверждает значимость удельной поверхности частиц при ее приготовлении.

Из результатов лабораторных исследований можно сделать вывод, что, создавая из доменного шлака и флюсового известняка единую мелкодисперсную систему, формируются благоприятные условия для полного взаимодействия их частиц с водой, что повышает однородность, плотность и прочность закладочного массива.

Установлено, что при определенном соотношении расхода и удельной поверхности доменного гранулированного шлака и отходов флюса можно получать достаточно прочный закладочный массив в первый месяц твердения. Соотношение и количество добавления компонентов закладки в смесь будет определяться прочностью от глубины ведения горных работ и порядком отработки камер (первая и вторая очереди).

Для установления влияния на прочность структурных особенностей закладочного массива проведены исследования структуры раздавленных образцов твердеющей закладки с обычной и увеличенной удельной поверхностью частиц шлака и отходов флюса.

3.4. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ ПРИ РАЗНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

После затворения компонентов закладки водой наступает процесс гидратации, который сопровождается сложными физико-химическими превращениями. Все минералы закладочных материалов находятся под

воздействием воды. Наиболее активные способны присоединять к себе молекулы воды и образовывать тем самым новые соединения. Изучение структурных новообразований в искусственном массиве является сложным процессом и требует проведения ряда физико-химических методов анализа твердого вещества, основанных на исследовании прежде всего минерального состава закладочных материалов и кристаллических структур в затвердевшей закладке. В исследовании взаимодействия компонентов закладки с водой (п. 2.1) нами рассмотрены возможные механизмы образования новых веществ, что легло в основу экспериментальных исследований структуры закладки. Особое влияние уделяется форме, химическому составу образований гидросиликатов кальция и их влиянию кальцита на прочность.

С помощью дериватографа Q-1500Д была исследована структура затвердевшего образца твердеющей закладки, применяемой в условиях ЗЖРК в возрасте 90 дней, прочность на сжатие которого составила 5,5 МПа. Термограмма затвердевшего образца представлена на рис.3.17.

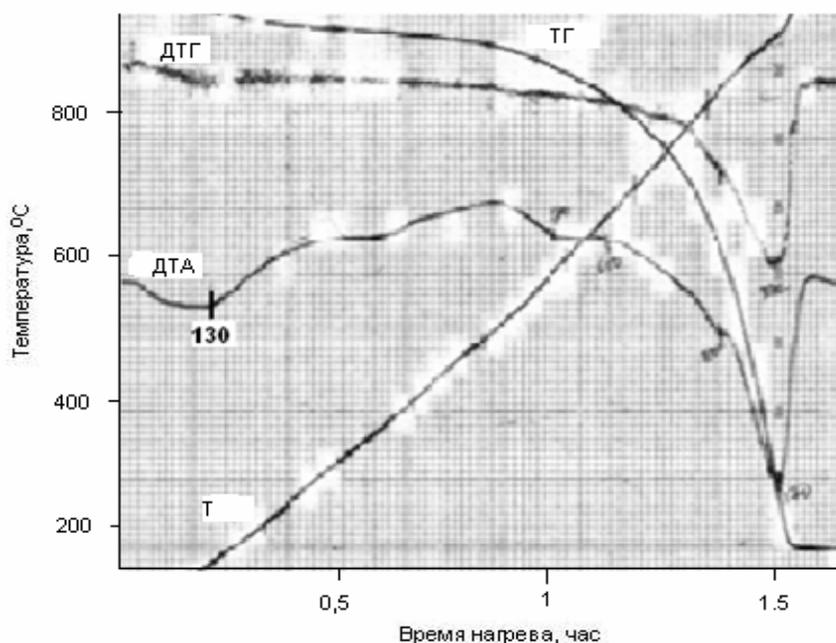


Рис. 3.17. Термограмма образца твердеющей закладки, применяемой в условиях ЗЖРК

В результате исследования образца затвердевшей закладки (рис. 3.17) прослеживается эндозффект $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, означающий дегидратацию, что соответствует тоберморитовому гелю – первоначальному состоянию гидросиликатов кальция. Данный тип гидросиликата расценивается как слабозакристаллизованное соединение переменного состава. В зависимости от насыщенности раствора ионами *Ca*, *Al*, *Si*, *Mg* окончательный тип гидросиликатов кальция формируется с течением длительного времени и зависит от активности и предрасположенности минералов к гидратации. Тоберморитовый гидросиликатный гель является

основным новообразованием, формирующим структуру твердеющей закладки. Данное исследование показывает, что структура представлена гелем, отсутствуют кристаллические новообразованные вещества.

При твердении в повышенных температурах гидросиликаты кальция изменяют свои свойства. Реакции образования гидросиликата кальция тоберморитового типа происходят медленно, при повышении температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше интенсивность резко возрастает [104]. В подземных условиях при твердении закладочный массив разогревается до температуры $50 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из этого следует, что изменений в структуре гидросиликатов кальция тоберморитового типа под воздействием экзотермических процессов гидратации происходить не будет.

На приборе SPECORD 75IR исследована структура твердеющей закладки ЗЖРК, где наибольший интерес представляют области колебания группы OH , Ca-O , Si-O (рис. 3.18).

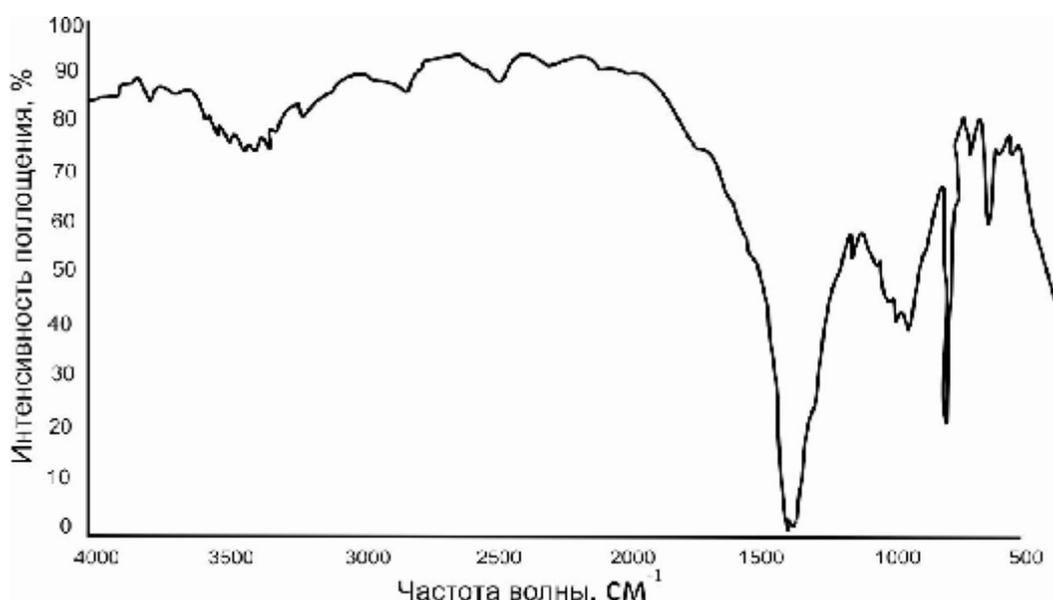


Рис. 3.18. Спектрограмма затвердевшего образца закладки, применяемой в условиях ЗЖРК ($S_{уд}=2000\text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж}=5,5\text{ МПа}$)

Спектрограмма затвердевшей закладки имеет широкую полосу поглощения с максимумом 3428 см^{-1} , что обусловлено колебанием группы OH , и полосу в области валентных колебаний кремнийкислородных связей Si-O $900 - 1100\text{ см}^{-1}$ и связей Ca-O 520 см^{-1} , указывающих на гидросиликаты кальция тоберморитового типа, что согласуется с результатами термических исследований. Таким образом, основным продуктом гидратации твердеющей закладки при измельчении доменного шлака в шаровой мельнице является гидросиликатный гель тоберморитового типа.

С целью исследования природы структурных особенностей твердеющей закладки с увеличенной удельной поверхностью частиц шлака и отходов флюса был также проведен методом ИК-спектроскопии анализ раздавленного на прессе лабораторного образца закладки с удельной поверхностью $4300\text{ см}^2/\text{г}$. На рис. 3.19 представлена спектрограмма

затвердевшего образца закладки с увеличенной удельной поверхностью частиц шлака и отходов флюса.



Рис. 3.19. Спектрограмма затвердевшего образца закладки с увеличенной удельной поверхностью частиц шлака и отходов флюса ($S_{уд.}=4300 \text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж}=8,0 \text{ МПа}$)

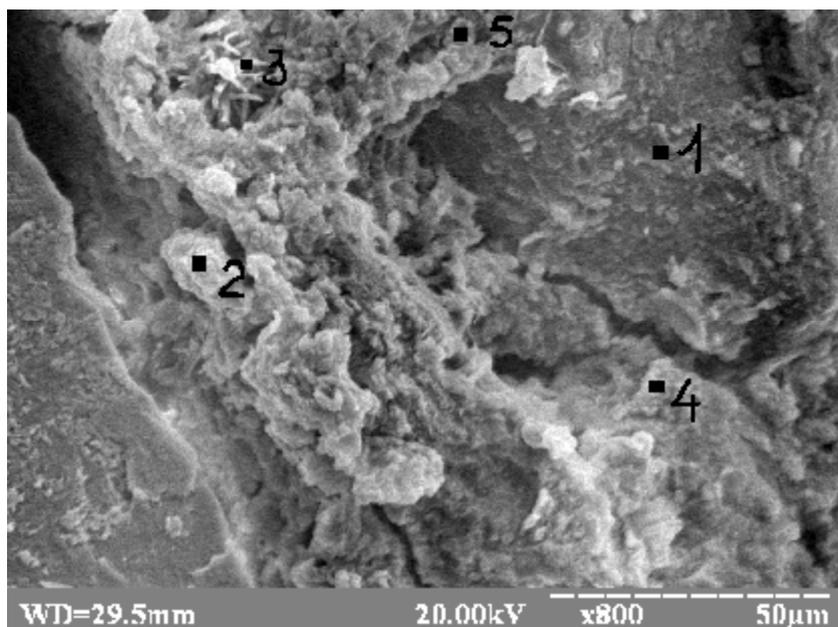
При сравнении спектрограммы образцов твердеющей закладки разной удельной поверхности (рис. 3.18 и 3.19) наблюдается усиление интенсивности полосы поглощения в области $900 - 1000 \text{ см}^{-1}$, что свидетельствует о возрастании сильной ковалентной $Si-O$ и снижении слабой ионной $Ca-O$ связей. Из этого следует, что можно говорить об упрочнении твердеющей системы и увеличении степени закристаллизованности связей гидросиликатов кальция. Усиление полосы в области $3400 - 3600 \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о росте количества новообразующихся гидросиликатов кальция в структуре закладки. Увеличение удельной поверхности приводит к изменению физических и химических свойств закладочного массива, а также потенциально активные минералы мелилит, псевдоволластонит и волластонит приобретают активность, что переопределяет их из слабогидратирующихся в самостоятельно гидратирующиеся минералы, способные при твердении в нормальных условиях формировать кристаллические новообразования.

Геленитовая и окерманитовая часть мелилита в обычном состоянии медленно гидратируется и образует лишь каемки гелеобразной массы гидросиликатов кальция. Псевдоволластонит и волластонит являются модификацией минерала портландцементного клинкера, которые также медленно гидратируются, образуя гидросиликаты тоберморитового типа, которые обозначаются как C-S-H(II).

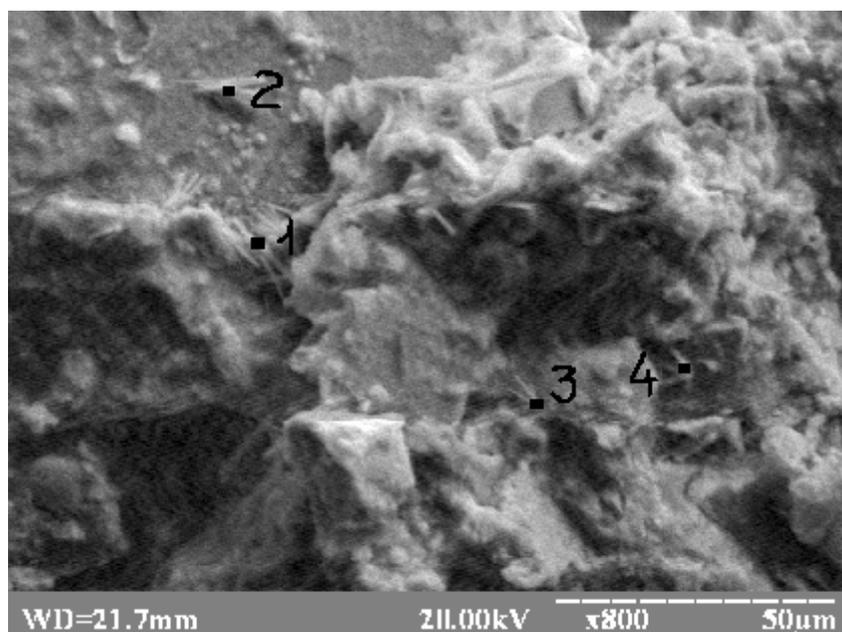
Результаты лабораторных исследований показали рост прочности закладки с увеличением удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса. Прочность затвердевшего камня зависит от формы, состава и плотности их распределения, кристаллических новообразований, соединяющих частицы инертного заполнителя.

ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

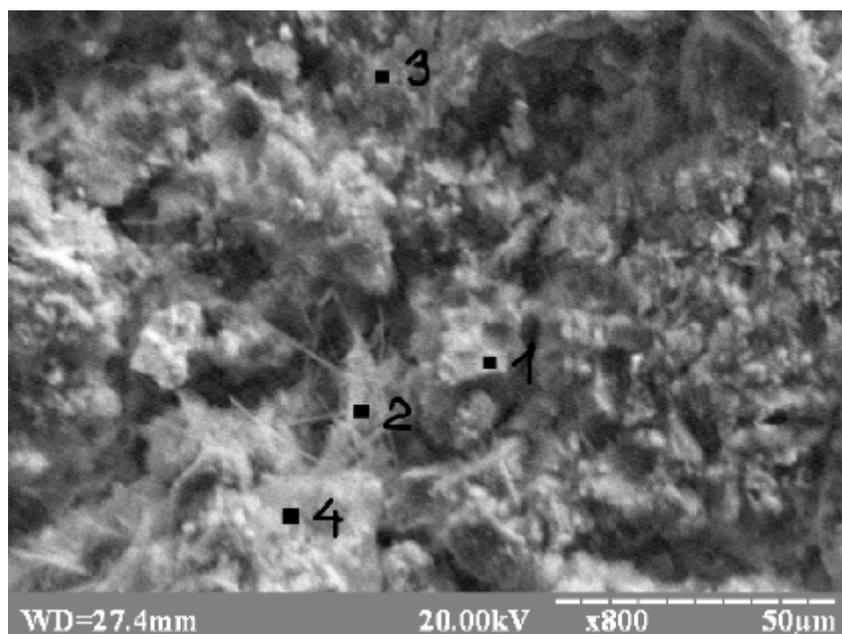
Для установления причины интенсивного роста прочности твердеющей закладки с увеличением удельной поверхности была исследована структура образцов затвердевшей закладки на растровом электронном микроскопе РЕММА-102-02, который позволяет проводить микрорентгеноспектральный полуколичественный анализ вещества. В результате исследования образцов твердеющей закладки разной удельной поверхности получены новые структурные формы, которые представлены на рис. 3.20.



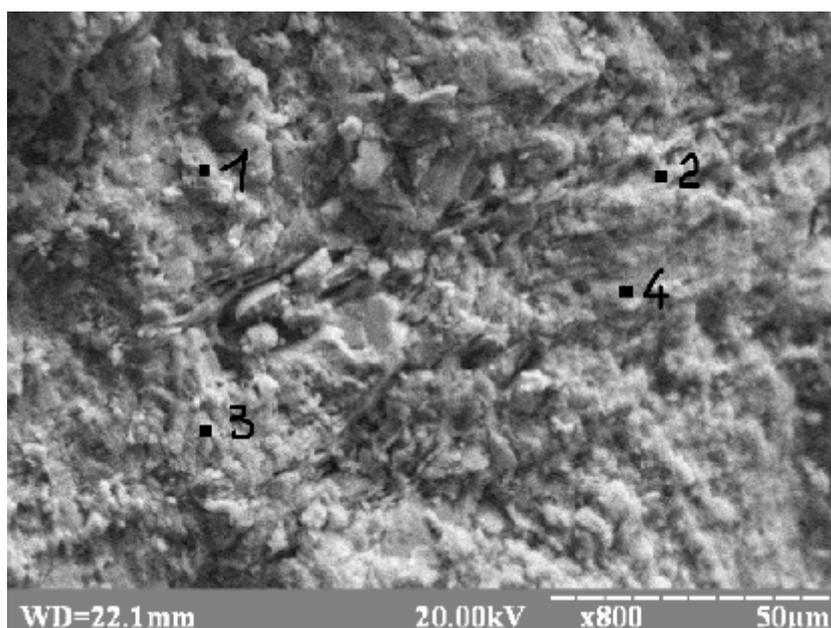
a



б



б



в

Рис.3.20. Структура закладочного камня при разной удельной поверхности частиц: а – традиционный состав (условия ЗЖРК, $S_{уд}=2000 \text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж}=5,5 \text{ МПа}$); б, в, г – экспериментальные составы (б – $S_{уд} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж} = 6 \text{ МПа}$; в – $S_{уд} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж} = 7,12 \text{ МПа}$; г – $S_{уд} = 6600 \text{ см}^2/\text{г}$, $\sigma_{сж} = 14,6 \text{ МПа}$)

Способность компонентов при затворении водой схватываться и твердеть зависит от единственного кристаллического компонента псевдоволластонита. Ряд других минералов приобретают гидравлические свойства лишь в условиях повышенной температуры.

Особое значение следует уделить изучению структуры твердеющей закладки, применяемой на ЗЖРК. Проведем анализ структурных особенностей исследованных образцов закладки по микрофотографиям.

Образец твердеющей закладки (ЗЖРК) при удельной поверхности доменного шлака 2000 см²/г. Исследован после трех месяцев твердения. Из рис. 3.20, а видно, что кристаллические новообразования располагаются между двумя крупными частицами заполнителя, соединяя их в массив. Кристаллические новообразования имеют плотные, округло-неопределенные формы частиц с выступающими неупорядоченными редкими одиночными иглами и пластинками. Новообразования представлены гидросиликатами кальция, которые находятся в гелеобразном состоянии.

Образец твердеющей закладки при удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса 2800 см²/г. Исследование образца (рис. 3.20, б) позволило установить структурные изменения, связанные с появлением сростков игольчатой формы, а также присутствие гидросиликатного геля округлой, пирамидальной и многогранной форм. Данная структура отличается от традиционной увеличением прочности в 1,8 – 2,5 раза.

Образец твердеющей закладки при удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса 4300 см²/г. В структуре данного образца (рис. 3.20, в) наблюдаются четко выраженные сформированные игольчато-волокнистая и остроугольная форма гидросиликатов кальция, заметно плотное распределение частиц в отношении друг к другу, меньшая пористость, полное покрытие зерен инертного заполнителя гидратными образованиями. Это приводит к увеличению силы сцепления кристаллических новообразований с инертным заполнителем и повышает сопротивляемость связей нагрузкам. При этом замечен переход от округлой к остроугольной форме новообразований. Данная структура отличается увеличением прочности в 3,1 – 3,5 раза.

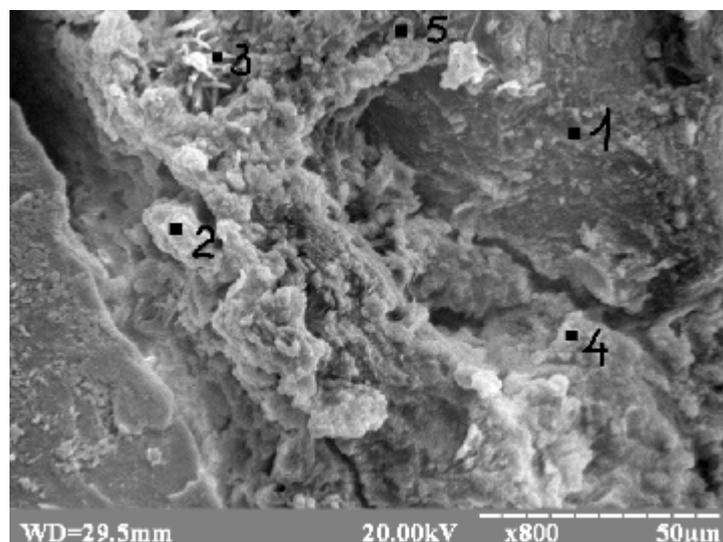
Образец твердеющей закладки при удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса 6600 см²/г. Исследование образца показало плотное прилегание частиц друг к другу, практически отсутствуют поры (рис. 3.20, г). Форма новообразований мелкокристаллическая, слоисто-пластинчатая. Игольчатая форма гидросиликатов кальция не формируется вследствие отсутствия пор и полостей в структуре, необходимых для роста кристаллов. Данная структура отличается увеличением прочности в 3,1 – 4,5 раза.

При аналогичном увеличении изломов всех образцов (50 мкм) видно, что структура твердеющей закладки изменяется с повышением дисперсности шлака и отходов флюса в направлении уменьшения пористости и размеров кристаллических новообразований.

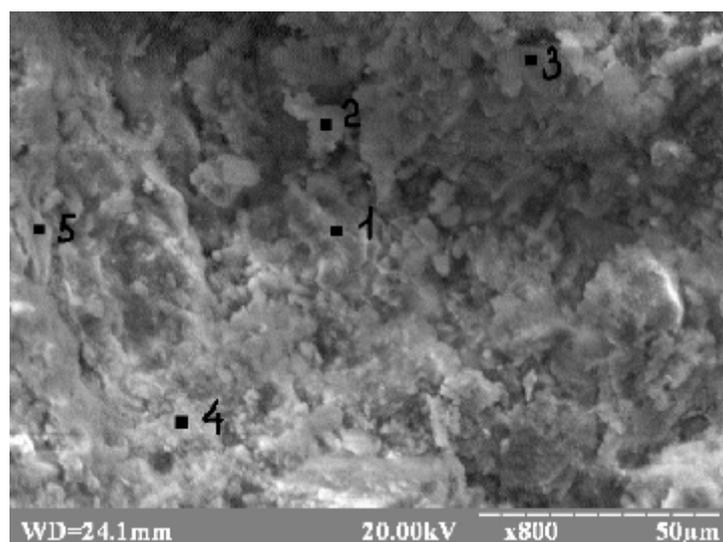
Для уточнения влияния технологического процесса закладочных работ (приготовление, транспортирование, возведение) на структурные особенности закладочного массива взят образец закладки камеры 4/1с этажа 775 – 825 м.

На рис. 3.20 представлены микрофотографии структуры лабораторного образца, который взят из бункер-смесителя перед подачей в закладочный

трубопровод, и образца закладочного массива после его возведения в подземных условиях.



а



б

Рис. 3.21. Микрофотографии структуры лабораторного (а) и шахтного (б) образцов: а – возраст 3 месяца, $CaO/SiO_2 = 2,68$; б – возраст 6 месяцев, $CaO/SiO_2 = 1,8$

На рис. 3.21, а гидросиликаты кальция в лабораторном образце представлены в виде гелеобразной массы округлой формы, а на рис. 3.21, б – шахтный образец сохраняет округлую форму гидросиликатов кальция, однако отсутствуют формы геля, так как степень закристаллизованности более высокая, чем в лабораторном образце, о чем свидетельствует снижение основности с 2,68 до 1,8. Это связано с длительным возрастом твердения. Присутствует пористость в обоих образцах. Следовательно, можно сделать вывод о том, что подземные условия (температура, давление, влажность) и технологические процессы закладочных работ

кардинально не влияют на форму и химический состав структурных образований твердеющей закладки. Приведенное сравнение подчеркивает значение химического состава и дисперсности исходных компонентов в формировании прочности закладочного массива. Процесс гидратации активных минералов саморегулируется, протекает по единому механизму и практически не отличается от приготовления на поверхности или возведения в камере.

Как известно, при формировании структуры цементного камня и росте прочности продукты гидратации – гидросиликаты кальция – формируют игольчато-нитевидные сростки. В возрасте трех месяцев твердеющая закладка, применяемая на ЗЖРК, практически не содержит игольчатых связей. Лишь в точке 3 (рис. 3.21, а) наблюдается начальный рост игольчатых образований.

Исследование структуры массива шлако-известняковой закладки, применяемой в условиях ЗЖРК, позволило установить ряд особенностей:

- через три месяца твердения исчезают прочные образования гидросиликатов кальция;
- кристаллические новообразования характеризуются средней уплотненностью, наблюдаются поры и межзерновые пространства.

О влиянии удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса на их полную гидратацию свидетельствуют фотографии излома образцов твердеющей закладки после продавливания их на лабораторном прессе (рис. 3.22). На рис. 3.22 видно, что темная область кристаллизации снижается с уменьшением удельной поверхности частиц. Следовательно, одной из причин слабой устойчивости искусственного массива при воздействии горного давления и сейсмических волн является наличие гидросиликатного геля и отсутствие в структуре к трехмесячному возрасту закладки прочных кристаллических связей гидросиликатов кальция, которые начинают формироваться к более позднему сроку. Об этом свидетельствуют показатели высокой прочности некоторых образцов в возрасте шести месяцев (9 – 13 МПа) с течением более продолжительного срока.



а



б



в

Рис. 3.22. Фотографии излома поверхности разрушенных образцов твердеющей закладки при разной площади удельной поверхности шлака и отходов флюса: а – при $S_{y\delta}=6600 \text{ см}^2/\text{г}$; б – при $S_{y\delta}=4300 \text{ см}^2/\text{г}$; в – при $S_{y\delta}=2800 \text{ см}^2/\text{г}$

Если в цементном камне гидросиликатный гель находится небольшой период времени и с последующим формированием прочных связей, то в закладочном камне при удельной поверхности $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ гидросиликатный гель присутствует не менее трех месяцев.

Чтобы установить тип основности образований гидросиликатов кальция, получили количественное содержание оксидов, входящих в их состав. С помощью микрорентгеноспектрального анализатора, встроенного в микроскопе РЕММА-102-02 проведены замеры химического состава образований гидросиликатов кальция в выбранных точках проб и получены спектры главных элементов *Ca*, *Si*, *Al*, *Mg*. При помощи программного обеспечения энергия спектров *Ca* и *Si* исследуемой точки пересчитана в оксидную форму CaO и SiO_2 и получены их процентные содержания.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Характеристика химического состава образований в экспериментальных образцах твердеющей закладки сведена в табл. 3.6.

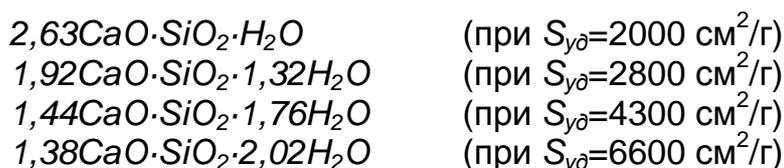
Таблица 3.6

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАМЕРОВ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ**

Образец твердеющей закладки	$S_{уд}$, см ² /г	№ замера	Содержание оксидов, %		Среднее значение CaO /SiO ₂	Форма новообразований
			CaO	SiO ₂		
ЗЖРК	2000	2	55,12	25,14	2,63	Округлая, неопределенная
		3	52,48	26,60		
		4	49,68	26,63		
		5	71,53	15,76		
Эксперимент № 1	2800	1	39,21	26,27	1,77	Пирамидальная, остроугольная, толстые иголки
		2	56,99	26,22		
		3	40,23	21,59		
		4	37,49	24,27		
Эксперимент № 2	4300	2	45,50	22,06	1,48	Пирамидальная, остроугольная, игольчато-волокнистая
		3	31,16	34,18		
		4	38,10	29,70		
Эксперимент № 3	6600	1	41,40	23,58	1,37	Мелкокристаллическая, слоисто-пластинчатая, остроугольная
		2	40,11	23,55		
		3	38,26	28,50		
		4	27,96	38,70		

Из данных, приведенных в табл. 3.6, видно, что наряду со снижением основности связей гидросиликатов кальция изменяется также их форма. Если в химических образованиях твердеющей закладки $CaO/SiO_2=1,77 - 2,63$, то образуются высокоосновные гидросиликаты кальция с округлой, пирамидальной, толстоигольчатой структурой, при $CaO/SiO_2=1,37 - 1,48$ – низкоосновные гидросиликаты кальция со слоисто-пластинчатой и игольчато-волокнистой структурой. В твердеющей закладке прочные низкоосновные гидросиликаты кальция согласно табл. 3.7 начинают формироваться при удельной поверхности шлака и отходов флюса свыше 4300 см²/г. Микроанализатор не позволяет фиксировать химический состав углерода, однако спектр показывает, что в связях присутствуют карбонатные вещества.

По данным замеров CaO и SiO₂ в экспериментальных закладочных смесях при различной степени удельной поверхности шлака и отходов флюса, используя положения вывода истинных формул, новообразованные гидросиликаты кальция можно описать следующими формулами:



Исследования показали, что прочность образований гидросиликатов кальция зависит от соотношения CaO/SiO_2 . Что касается твердеющих

смесей, в отличие от бетона слабая степень кристаллизации гидросиликатов кальция достаточна для формирования прочности закладочного массива 5 – 7 МПа. Увеличение глубины разработки и, как следствие горного давления приведет к необходимости упрочнения закладочного массива и прежде всего химических образований его структуры.

Обработка и усреднение данных табл. 3.8 позволила установить экспериментальную степенную зависимость основности гидросиликатов кальция, формирующих прочность массива твердеющей закладки от удельной поверхности частиц доменного шлака и отходов флюса, которая представлена на рис. 3.23.

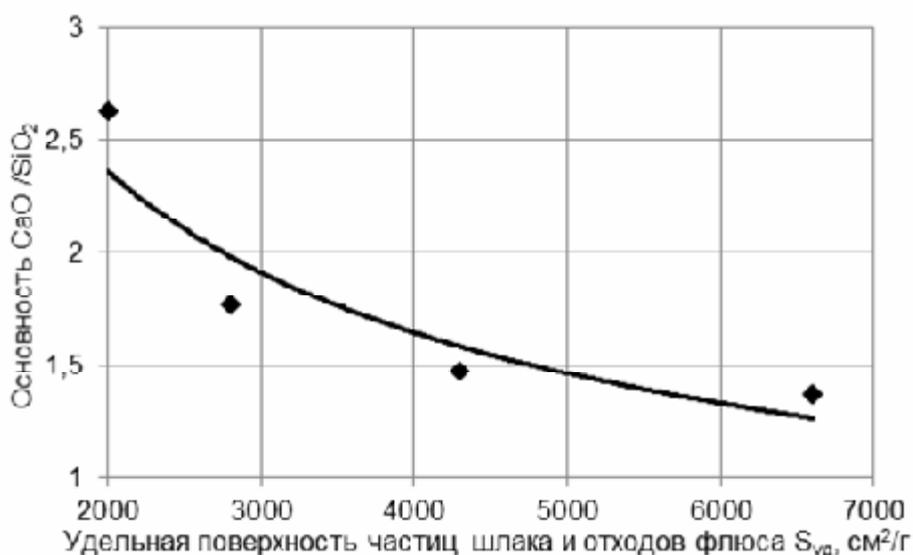


Рис. 3.23. Зависимость основности CaO/SiO_2 гидросиликатов кальция от удельной поверхности шлака и отходов флюса

Из зависимости, приведенной на рис. 3.22, следует, что увеличение удельной поверхности частиц вяжущего материала приводит к снижению основности в 1,8 раза и способствует преобразованию высокоосновных связей гидросиликатов кальция в низкоосновные, что объясняет интенсивный рост прочности. Зависимость основности связей гидросиликатов кальция в твердеющей закладке от площади удельной поверхности выражается эмпирическим уравнением

$$CaO/SiO_2 = 24 S^{-0,52}, \text{ при } R^2 = 0,86.$$

Это позволяет управлять этими параметрами твердеющей закладки, а использование отходов флюсового производства как части вяжущего материала дает возможность снизить расход доменного шлака и повысить прочность закладочного массива в 3,1 – 4,5 раза.

С повышением удельной поверхности форма новообразований закономерно изменяется, игольчато-волокнистая структура гидросиликатов

кальция переходит в слоисто-пластинчатую. Таким образом, установлено структурное изменение формы и состава кристаллических новообразований с увеличением удельной поверхности частиц в составе твердеющей закладки.

Характер зависимости показывает наибольшее снижение основности гидросиликатов кальция в структуре закладки и повышение прочности в диапазоне удельной поверхности 2000 – 4300 см²/г. При величине удельной поверхности свыше 4300 см²/г снижение основности происходит менее динамично. Учитывая данный факт при увеличении удельной поверхности в составе закладочной смеси нет необходимости размалывать шлак и известняк до высоких показателей дисперсности, что влечет за собой энергосбережение при измельчении.

Исходя из величины CaO/SiO_2 кристаллических новообразований твердеющей закладки, видно, что результаты хорошо коррелируют с теоретическими предположениями формирования гидросиликатов кальция, сходимость составляет 90 %. Установить наличие четырехкальциевого моно- карбонатного гидроалюмината в структуре закладки удалось только посредством ИК спектроскопии.

Установлено, что оптимальный диапазон удельной поверхности шлака и отходов флюса составляет 2800 – 5500 см²/г, при котором формируется три вида структуры твердеющей закладки: крупноигольчатая, игольчато-волоконистая, слоисто-пластинчатая.

Разработаны составы с определенными структурными образованиями, которые следует применять при ведении горных работ в сложных условиях. На основе полученных закономерностей формирования структуры и прочности твердеющей закладки будут разработаны технологические параметры формирования закладочного массива на основе тонкодисперсных вяжущих веществ.

Приведенные исследования будут учитываться при режиме заполнения камер и повышении устойчивости вертикальных обнажений закладочного массива. Для применения полученных составов закладки необходимо определить и обосновать области упрочнения закладочного массива на основе данных о вывалах и распределения прочности по высоте камеры.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И СЛОИСТОСТИ В ЗАКЛАДОЧНОМ МАССИВЕ КАМЕР БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

При подземной добыче мощных рудных залежей камерными системами с твердеющей закладкой одним из важных вопросов является сохранение устойчивости обнажения искусственного массива, способного безопасно воспринимать нагрузку от налегающих пород. Прочность искусственного массива обеспечивается, прежде всего, подбором закладочных материалов и их способностью вступать в физико-химические реакции.

Из практики применения твердеющей закладки как способа управления горным давлением известно, что заполнение пустот даже малопрочными смесями ($\sigma_{сж}$ до 1 МПа) снижает напряжения в окрестностях выработки в 1,4 – 1,6 раза по сравнению с вариантом без заполнения пустот [105]. Однако в практике разработки Южно-Белозерского месторождения существуют причины, препятствующие применению малопрочных закладочных составов:

- месторождение разрабатывается в сложных горно-геологических условиях;

- высота очистных камер составляет более 100 м (значительные вертикальные обнажения);

- применяется скважинная отбойка руды в значительных масштабах (при массовом взрыве используется до 10 и более тонн ВВ);

- содержание Fe в добытой руде достигает 60 % и более, попадание небольшого количества закладки ведет к существенному снижению качества добываемой руды;

- подготовка новых рудных запасов осуществляется на глубине свыше 940 м.

Для исследования возведения и формирования прочности закладочного массива при заполнении отработанных камер были проанализированы данные закладочных работ за период 2003 – 2012 годов, в течении которого используется шлако-известняковая закладка. Данные закладочных работ за указанный период взяты в связи с тем, что при заложении камер твердеющей закладкой до 2002 г. применялся состав вида «цемент – шлак – песок – вода». В нашей работе исследуется состав «шлак – известняк – порода». Проанализированы следующие параметры: производительность комплекса, время работы шаровых мельниц, подвижность смеси, состав закладочной смеси, прочность закладочной смеси перед подачей в камеру в возрасте 90 дней, контроль тонкости измельчения вяжущего материала. Были установлены и просчитаны слои твердеющей закладки, которые образуются при остановке закладочного комплекса в процессе укладки закладочной смеси в камере. В зависимости от технологических особенностей отработки и значимости камер выработанное пространство заполняют различными составами. За время применения шлако-известняковой закладки с породой обработаны данные контроля прочности при разных составах закладки и получена зависимость средней прочности от расхода шлака, которая представлена на рис. 3.24.

При изменении расхода Q доменного шлака с 280 до 600 кг/м³ прочность закладки возрастает на 25 %. Научно-исследовательским горнорудным институтом (г. Кривой Рог) рекомендовано добавлять в закладку в среднем 400 кг шлака на 1 м³, при этом предполагается, что набор прочности достигает нормативного предела.

ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

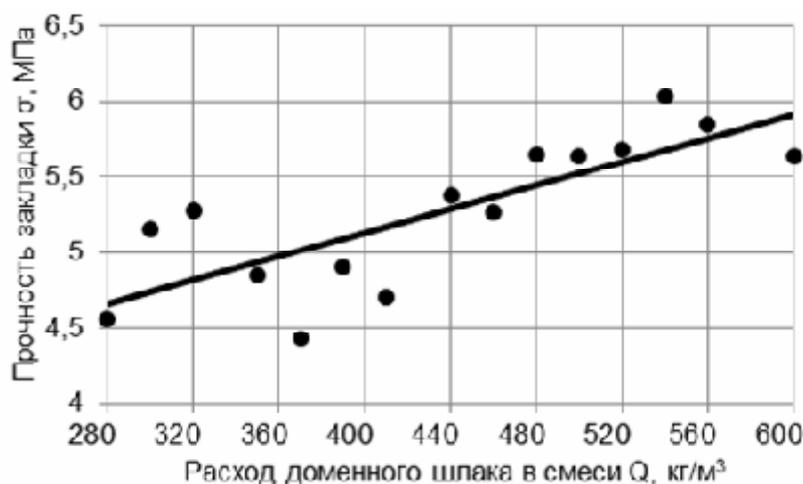


Рис. 3.24. Зависимость прочности твердеющей закладки от расхода доменного шлака в возрасте 90 дней

Для условий Запорожского железорудного комбината прочность закладки σ от расхода доменного шлака Q выражается эмпирическим уравнением вида

$$\sigma = 0,003Q + 3,57, \text{ при } R^2 = 0,619.$$

Из графика (рис. 3.24) видно, что при большом расходе граншлака (400 – 550 кг/м³) прочность не достигает нормативного значения. Следовательно, при измельчении частиц крупностью -0,074 мм, которые составляют 50 – 55 %, экономически невыгодно подавать порции шлака свыше 450 кг/м³. Доменный шлак, как вяжущий компонент, не полностью задействован в физико-химическом процессе образования структуры закладки. Лишь при порции 550 кг/м³ прочность достигла 6 МПа, но дальнейшее увеличение расхода доменного шлака приводит к постепенному снижению прочности закладки. Для ее повышения необходимости применять в закладочных смесях дорогостоящий цемент. К этим мерам приступают для упрочнения днищ камер и слоев закладки в местах расположения подэтажных выработок.

Обработка данных закладочных работ позволила установить ряд зависимостей прочности закладки от доли частиц в пульпе при промышленной тонкости помола 50 – 55 % частиц -0,074 мм при разных соотношениях компонентов в закладочной смеси (рис. 3.25).

Анализ приведенных зависимостей (рис. 3.25) показывает следующее: возрастание прочности закладки наблюдается при тонкости измельчения 55 % частиц крупностью -0,074 мм. В процессе добычи руды на горизонтах 640, 740 и 840 м при составе закладки с высоким соотношением вяжущее-заполнитель 1:4,1 (расход шлака в смеси 510 кг/м³) и максимальной тонкости измельчения 55 % не представляется возможным формирование закладочного массива прочностью 8 – 10 МПа.

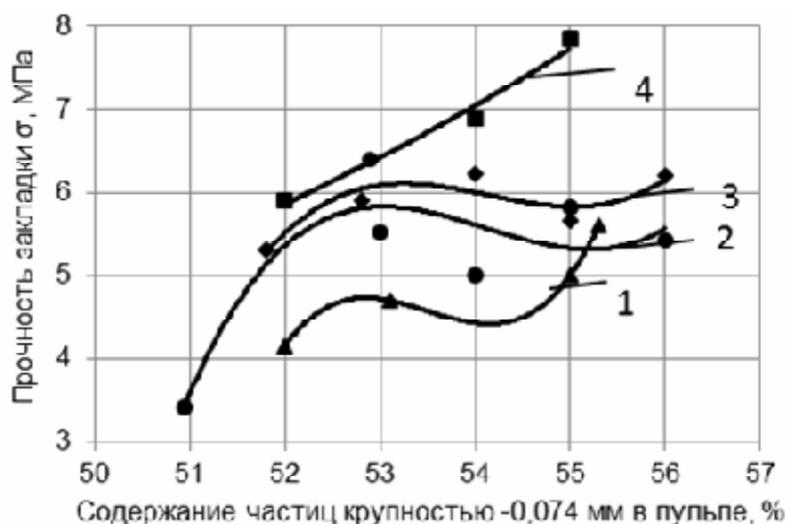


Рис. 3.25. Зависимость прочности закладки от содержания частиц крупностью - 0,074 мм в пульпе мельницы при разных соотношениях вяжущее-заполнитель: (1) – 1:6,4; (2) – 1: 4,6; (3) – 1:4,5; (4) – 1: 4,1

Значительную сложность в формировании закладочного массива нормативной прочности оказывает неравномерность измельчения шлака в шаровой мельнице, которое изменяется в достаточно широких пределах от 46 до 55 % частиц крупностью -0,074 мм. Постоянство распределения доли тонких частиц в закладочной смеси при определенном соотношении химических соединений обеспечит требуемую прочность закладочного массива.

В настоящее время на ЗЖРК ведется добыча руды в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м. Объем очистного пространства камер, подлежащих закладке, имеет разные величины и зависит от колебания мощности рудной залежи. Камеры северного крыла имеют меньшие размеры, а южного – большие. Объем выработанного пространства камер северной части залежи находится в пределах 60 – 90, а южной части – 100 – 150 тыс.м³. Размер выработанного пространства для размещения определенного объема закладки оказывает влияние на слоистость закладочного массива. С его увеличением возрастает число слоев уложенной твердеющей закладки.

Рассмотрим камеры этажей 640 – 740, 740 – 840 м по объему уложенной твердеющей закладки. Слоем закладки считаем объем уложенной порции закладочной смеси, когда перерывы времени между подачами порций закладочной смеси составляют более 20 ч. Это означает, что произошла потеря подвижности смеси и начался процесс схватывания, связанный с гидратацией активных минералов. В табл. 3.7 представлены данные объемов заложенных камер и аналитически определены количественные значения слоев уложенной закладки. Полученные результаты свидетельствует о неоднородности получаемого искусственного массива как по структуре так и по прочности.

Таблица 3.7

**РАСЧЕТНОЕ КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕННОМ
ОБЪЕМЕ ПУСТОТ КАМЕР**

Этаж	Камера	Расчетное количество слоев	Объем, м ³
605 – 740	1/7ю	19	158,2
605 – 740	2/1ю	16	96,8
605 – 740	1/3ю	14	126,8
605 – 740	1/1ю	10	169,4
605 – 740	1/15ю	25	169,7
690 – 840	1/3с	15	126,7
715 – 840	1/1с	17	109,4
740 – 840	2/9ю	20	172,4
740 – 840	1/5ю	26	163,3
605 – 740	1/9ю	15	122,1
715 – 840	1/1ю	17	169,7
605 – 740	2/9ю	22	143,3
605 – 740	2/5ю	11	99,3
715 – 840	2/3с	13	94,4
605 – 740	2/8ю	15	103,6
740 – 840	2/13ю	13	69,2

Данные табл. 3.7 представим в виде графика, который приведен на рис. 3.26. График распределения слоев закладки в камерах различных объемов показывает тенденцию возрастания числа слоев твердеющей закладки с увеличением объема пустот камер, способствуя неоднородности массива. Это объясняется тем, что с увеличением объема очистного пространства, подлежащего закладке, возрастает вероятность проявления факторов, влияющих на слоистость.

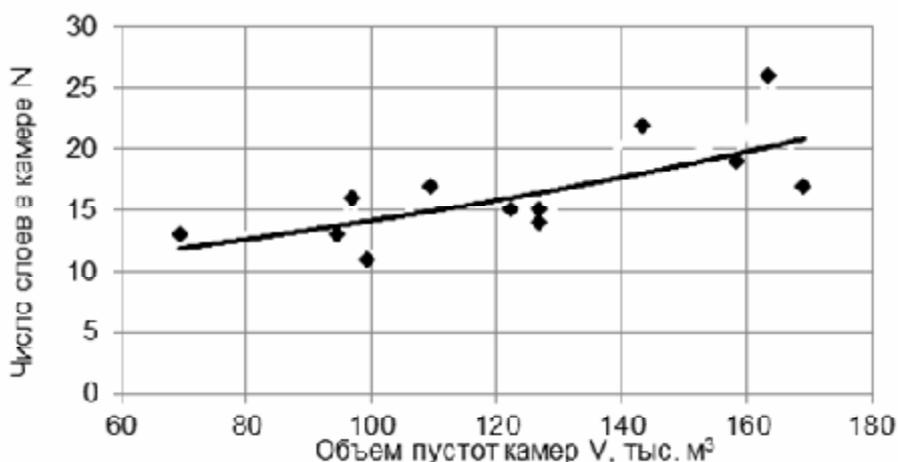


Рис. 3.26. Распределение числа слоев закладки от объема камер

Распределение количества слоев в заложеной камере от ее объема может быть представлено уравнением вида

$$N = 0,0962V + 4,6417, \text{ при } R^2 = 0,50, \quad (3.9)$$

где N – число слоев закладки в камере;

V – объем пустот камеры, м³.

Неблагоприятным фактором, влияющим на устойчивость заложеной камеры, является резкое колебание прочности закладки в слоях, которое достигает 2 – 4 МПа или 50 – 70 % от установленного норматива. Физико-механические свойства слоев твердеющей закладки характеризуются изотропностью.

Слоистость закладочного массива определяется количеством подэтажей в камерной системе разработки. При камерной системе разработки в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м четыре подэтажа. Уменьшение количества слоев закладки может быть достигнуто при переходе на другой вариант системы разработки, где уменьшается количество подэтажных нарезных выработок.

Устойчивость горизонтальных и вертикальных обнажений закладочного массива находится в прямой зависимости от качества закладочной смеси, времени твердения и монолитности, а монолитность зависит от степени расслоения смеси в перерывах при закладке камер.

Шахтные наблюдения позволили подтвердить интенсивность влияния горного давления на выработки со стороны висячего бока залежи. Состояние штрека висячего бока гор. 480 м характеризуется как неустойчивое, наблюдается массовое отслоение пород от контура, разрушается торкрет-бетон, происходит шелушение кварц-хлорит-серицитовых сланцев по сечению со стороны влияния очистных работ, что подтверждает действие призмы сползания пород. Сопряжения выработок испытывают значительные напряжения, разрушается руда и закладка, так как возникающие напряжения превышают прочность руды и закладки на сжатие. На сопряжениях выработок, пройденных по закладочному массиву, наблюдается разрушение и скалывание закладочного массива.

Установлено, что закладочный массив обладает слоистостью на всех горизонтах и по элементам камер (потолочина, днище, бока). Неоднородность закладочного массива по прочности наблюдается в камерах первой очереди отработки в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м. Это – негативный фактор, так как массив является несущей опорой при разработке камер второй очереди. В очистное пространство закладочный массив обрушается в двух направлениях: при разработке камер нижележащего этажа в форме обрушения заложеного днища верхнего этажа и с боков ранее заложённых камер.

С увеличением непрерывности подачи закладочной смеси количество слоев уменьшается, массив приобретает монолитность. Стоит отметить, что прочность днищ камер достаточно часто получается низкой, даже с учетом добавления цемента. Это связано с тонкостью помола шлаков и свойствами новообразований. Как правило, слой твердеющей закладки днища камеры отстает 24 часа и более. Второй слой обладает более низкими прочностными свойствами и связь контакта поверхностного слоя днища (адгезия) и второго слоя ослабевает, приводя к отрыву (отслоению) объема закладки днища камеры под действием гравитационных сил. Важную роль также играет время старения смеси первого слоя (днища), так как с увеличением времени отстаивания слоя закладки сила адгезии между

первым и вторым слоем будет снижаться. Поэтому при сокращении отстаивания уложенной порции закладочной смеси $t < 20$ ч заложенный массив стремится к однородности. Для снижения слоистости закладочного массива не представляется возможным уменьшить число остановок мельниц, поэтому прочность в формируемых слоях должна соответствовать нормативной.

Средняя прочность закладочного массива не всегда выдерживается, что прослеживается в камерах этажа 605 – 740 м: 1/5ю – 4,5 МПа, 1/1 с – 5,4 МПа, 2/3с – 5,4 МПа, 2/9ю – 5,3 МПа, 1/3ю – 5 МПа, 2/7ю – 5,3 МПа, 2/2ю – 4,7 МПа, 2/13ю – 4,4 МПа, 1/9ю – 4,4 МПа, 1/9с – 4,6 МПа, 2/0 – 4,0 МПа, 2/2с – 4,9 МПа, 1/7с – 5,1 МПа, 1/11ю – 5,4 МПа, 1/15ю – 5,3 МПа, 0/11 ю – 4,8 МПа, 0/13ю – 5,3 МПа; 2/8ю – 5,0 МПа, 2/4с – 5,0 МПа, 1/16с – 5,3 МПа; и в этаже 715 – 840 м: 2/3ю – 5,4 МПа, 2/3с – 4,1 МПа, 2/1 ю – 4,3 МПа, 1/3ю – 4,7 МПа, 1/5с – 5,7 МПа, 2/11ю – 4,4 МПа. 1/5ю – 5,0 МПа, 2/9ю – 4,9 МПа, 1/8с – 5,4 МПа. Если для вторичных камер прочность и состав закладки не регламентируется, то для первичных камер прочность должна соответствовать нормативному значению. Снижение прочности приводит к разрушениям закладочного массива.

При увеличении глубины разработки растягивающие напряжения вокруг очистной камеры возрастают и на глубине 940 м достигают $4,2\gamma H$ или 7,9 МПа [53]. Фактическая прочность закладочного массива составляет 5,5 – 7 МПа, что недостаточно для сохранения устойчивости участка наклонного днища камеры, где формируются максимальные значения напряжений. Следовательно, после отработки нижележащего этажа увеличивается вероятность обрушения искусственной кровли.

Характером обрушения закладочной массы является отслоение и выдавливание с последующим осыпанием части заложенного массива от общего объема заложенной камеры. Узким местом при заполнении очистной камеры твердеющей смесью является создание прочного фундамента днища. От прочности твердеющей закладки днища будет зависеть устойчивость кровли очистной камеры нижележащего этажа. При отработке руды глубоких горизонтов этажей 640 – 740 и 740 – 840 м камеры имеют большие значения, площадь и высота обнажения закладочного массива увеличиваются, что требует строгого подхода к прочности.

В очистном пространстве камер 1/7ю, 1/3ю, 1/1ю (этаж. 605 – 740 м) и 1/8с (этаж 740 – 840 м) размещены расчетные слои твердеющей закладки определенной высоты согласно параметрам работы закладочного комплекса. Рассчитаны объемы слоев закладки, средняя прочность слоя, высота заполнения.

Объем слоя закладки вычислялся из выражения

$$V_c = t \cdot Q_3, \text{ м}^3,$$

где t – время заполнения слоя, ч;

Q_3 – производительность закладочного комплекса, $\text{м}^3/\text{ч}$.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Средняя прочность в слое определялась по контрольным замерам прочности в пределах слоя, а прочность самого слоя – из выражения

$$S_c = \frac{Ss_i}{n}, \text{ МПа,}$$

где Ss_i – суммарные замеры прочности в пределах слоя закладки, МПа;

n – число замеров прочности в слое закладки.

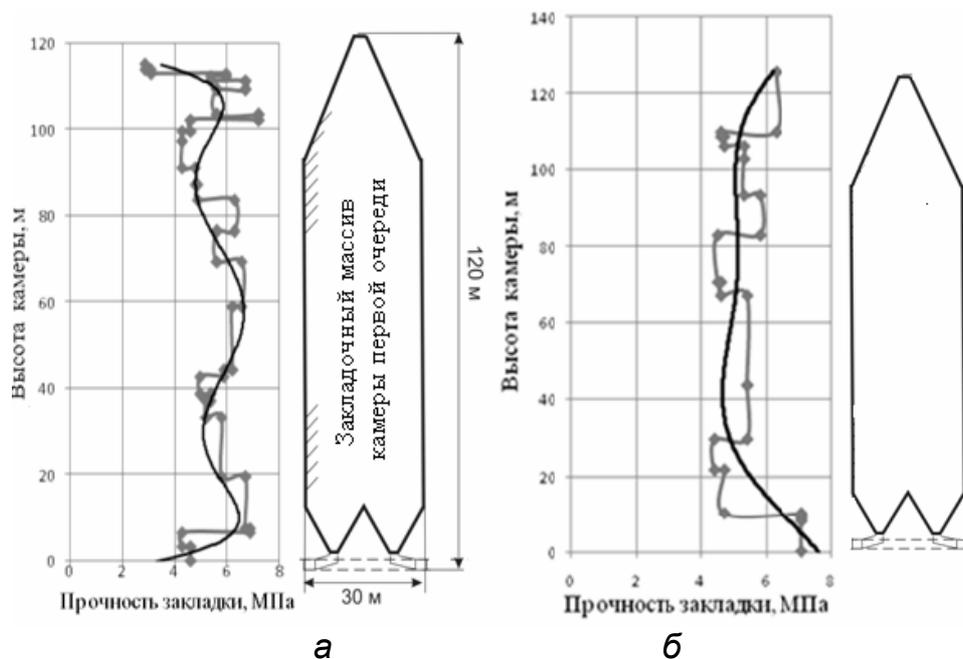
Высота заполнения вычислялась по фактическим размерам камеры (ширина и длина), согласно которым определяется горизонтальная площадь камеры. Поскольку горизонтальные площади камеры фактически постоянны по высоте, то высота заполнения закладки определялась

$$h_c = \frac{V_c}{S_k}, \text{ м,}$$

где V_c – объем уложенного слоя, м³;

S_k – горизонтальная площадь камеры в месте укладки слоя, м².

Расчет объема и прочности слоев каждой камеры позволил нам установить зависимости распределения прочности слоев закладки по высоте камеры. На рис. 3.27 представлены графики распределения прочности по высоте камеры. Нормативная прочность закладки для этажа 640 – 740 м составляет 7 МПа, а для 740 – 840 – 8 МПа.



**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

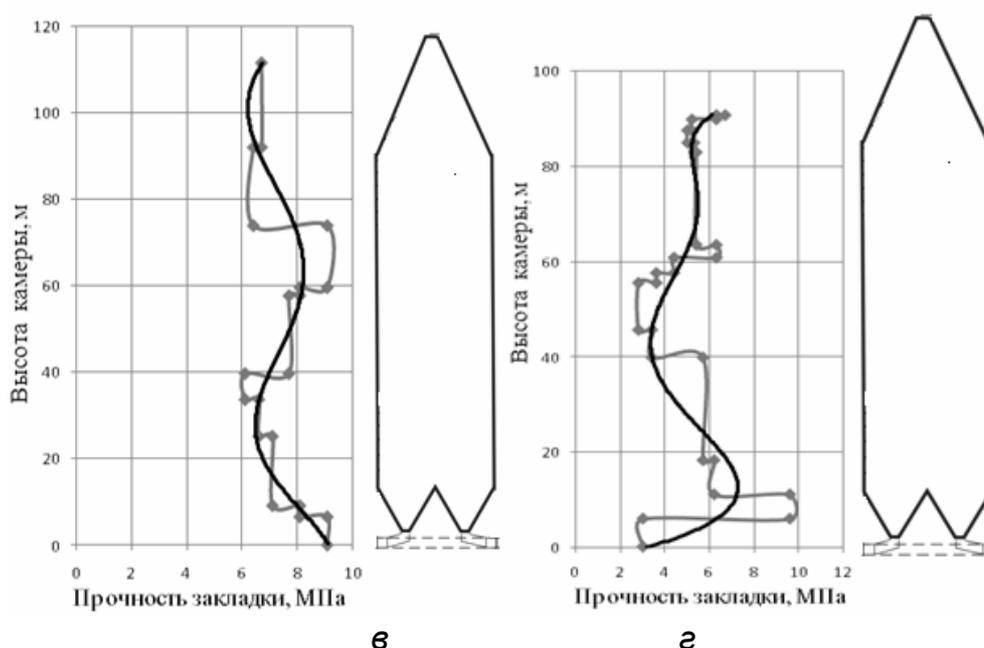


Рис. 3.27. Распределение прочности закладки по высоте камер: а – к 1/15ю эт. 605 – 740 м; б – 1/8с эт 715 – 840 м; в – к 1/7ю эт. 605 – 740 м; г – к 1/3с эт. 715 – 840 м

Анализ графиков рис. 3.27 показал, что распределение прочности в камере характеризуется криволинейностью, при этом устойчивость вертикального обнажения искусственного массива не обеспечивается. Выпуклости графиков, не пересекающие условную линию нормативной прочности, приводят к формированию концентраций напряжений и ориентируют направления вывалов закладочного массива в очистное пространство. Наиболее часто снижение прочности происходит на участках сопряжения бока камеры с кровлей или острием днища. Области пониженной устойчивости при построении зависимостей прочности по высоте камер хорошо согласуются с данными областей фактических вывалов.

Данные распределения прочности по высоте камеры показывают слабоустойчивые области закладочного массива, которые попадают в зону разрушений. Эти данные коррелируются с данными маркшейдерских наблюдений за вывалами закладки.

При нагрузке на искусственный массив камер первой очереди происходит выдавливание маломощных низкопрочных слоев в очистное пространство камеры второй очереди, что приводит к разубоживанию добываемой руды. При производстве строительных конструкций данный эффект носит название внецентренное сжатие, которое представляет собой вид деформации, когда равнодействующая сил не совпадает с осью конструкции. В заложенных камерах этому способствует неравномерность распределения прочности по высоте. Из этого следует, что необходимо соблюдать линейность распределения прочности по высоте для

предотвращения негативных проявлений разрушения или же формировать прочность закладочного массива не ниже нормативной.

Прочность по высоте камеры распределяется по полиномиальной зависимости. Несоответствие предела прочности закладки в этих областях относительно значения нагрузок на массив в целом, возникающих на глубине 640 – 740 и 740 – 840 м, приводит к разрушению и вывалообразованию закладочного массива.

Для заполнения выработанного пространства очистных камер используют несколько составов твердеющей закладки. Некоторые камеры заполняют однородным составом, другие – тремя-четырьмя составами закладки, это объясняется одновременным заполнением нескольких камер. Следует заметить, что полиномиальный характер распределения прочности по высоте камеры образуется вследствие неравномерности соотношений химических соединений CaO/SiO_2 по высоте в связи с изменением состава. Разработанные составы твердеющей закладки позволяют, не меняя соотношения CaO/SiO_2 , достигать требуемой прочности. Это осуществимо за счет изменения дисперсного состояния доменного шлака и отходов флюса при постоянном химическом составе, т. е. за счет изменения физико-химических свойств без нарушения соотношения компонентов.

Для расчета прочности закладочного массива учитываются показатели лабораторного контроля прочности закладочной смеси, вследствие этого выводится среднеарифметическое значение по камере. При возведении закладочного массива слои закладки определенной прочности заполняются на разную высоту, следовательно, необходимо не только учитывать прочностные значения, но и высоту заполнения слоев, что несомненно влияет на устойчивость всего закладочного массива. Данное утверждение можно представить в виде коэффициента изменения прочности закладки по высоте камеры:

$$k = \frac{S}{S_h},$$

где S – среднеарифметическая прочность слоев закладки в камере, МПа;

S_h – прочность закладки с учетом высоты заполнения, МПа.

$$S_h = \frac{\sum_{i=1}^n S_i h}{H_k}, \text{ МПа,}$$

где S_i – прочность слоя закладки, МПа;

h – высота заполнения слоя в камере, м;

H_k – высота камеры, м.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

После заполнения твердеющей закладкой очистной камеры по значениям средней прочности закладки можно уточнить прочность заложённой камеры, которая учитывает высоту заполнения. Это даст возможность корректировать расчет параметров очистного пространства выемочных камер, где учитывается прочность закладки. Прочность камеры с учетом высоты заполнения может отличаться от принятой в паспортах до 15 %.

Установленный коэффициент свидетельствует о негативном влиянии слоистости закладочного массива на его прочность, так как массив разбит на разномошные и разнопрочные слои. Необходимо формировать закладочный массив с прочностью не ниже нормативной. Если количество слоев не удастся уменьшить, то для устойчивого состояния закладочного массива следует повышать их прочность, чтобы предотвратить влияние очистного пространства обрабатываемой камеры.

В условиях ЗЖРК это затруднительно, так как применяемый состав закладочной смеси по фактору схватываемости и набору прочности не позволяет над слоем подэтажной выработки размещать мощные слои закладочного массива. Поэтому на уровне подэтажной перемычки необходимо создавать слои закладки высокой прочности до 10 МПа с помощью разработанных в п. 3.3 составов твердеющей закладки, которые характеризуются более интенсивным структурообразованием во времени для удержания мощных слоев.

Необходимый объем упрочненного слоя закладки будет определяться по формуле

$$V_з = a \cdot L \cdot h_д , \text{ м}^3,$$

где a – ширина камеры, м;

L – длина камеры на уровне подэтажа, м;

$h_д$ – допустимая высота заполнения закладки на уровне перемычки, м.

Для предотвращения разрушения закладочной перемычки на уровне расположения подэтажных выработок высота заполнения слоя закладки по технологии не должна превышать 5 м.

Для устойчивости искусственного массива из твердеющей закладки имеет значение высота заполнения слоев закладки. Учитывая исследования структуры закладки на основе тонкодисперсных частиц, области разрушения закладочного массива и распределение прочности по высоте, необходимо упрочняющие слои размещать ближе к днищу и кровле.

В результате выполненных исследований установлено, что в системах разработки рудных залежей с твердеющей закладкой прочность искусственного массива изменяется по полиномиальной зависимости с концентрацией вывалов на выпуклостях кривой контура камеры. Это позволяет снизить вывалы закладочного массива, повысить его устойчивость к обнажению и уменьшить разубоживание руды, изменяя

технологические параметры закладочной смеси (прочность массива повышается в 1,8 – 2,5 раза при крупноигольчатой форме новообразований, в 3,1 – 3,5 раза при игольчато-волокнистой форме и в 3,1 – 4,5 раза при слоисто-пластинчатой форме).

Таким образом, формирование устойчивого закладочного массива зависит от следующих параметров: соотношения химических элементов в компонентах закладки, дисперсности вяжущего материала, прочности и высоты уложенного слоя.

Обобщая результаты физико-химического исследования закладочных материалов и массива, лабораторных исследований и условий формирования закладочного массива в подземном пространстве стоит отметить, что одним из путей повышения устойчивости закладочного массива является изменение его структурных образований.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ВЕДЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ ОЧИСТНЫХ КАМЕР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ

4.1. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ ОЧИСТНЫХ КАМЕР

В большей части залежи «Главная» Южно-Белозёрского месторождения в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м висячем боку залегают оталькованные серпентиниты слабой устойчивости, которые не допускают значительных обнажений во времени. Их обрушение приводит к засорению руды. Интенсивная отработка и быстрая сдача очистных камер для формирования прочного искусственного массива может противодействовать этому негативному явлению.

Установлено, что наиболее прочными и устойчивыми структурами гидросиликатов кальция в образованиях закладочного массива являются игольчато-волокнистая и слоистая структуры, $CaO/SiO_2 = 1,4 - 1,5$. При соблюдении данного условия формируется более прочный и устойчивый закладочный массив. Слои твердеющей закладки на основе мелкодисперсных частиц характеризуются прочными адгезионными свойствами и лучше схватываются с поверхностью уложенного слоя.

Когда применяют промышленную тонкость измельчения компонентов в закладочном комплексе, то наиболее прочная структура искусственного массива формируется при максимальном значении 55 % частиц крупностью -0,074 мм. Однако данной величины дисперсности недостаточно для интенсивного превращения гелеобразной массы при гидратации минералов доменного шлака в сформированные прочные кристаллические структуры. Как показали микроскопические исследования, в некоторых областях структуры закладки ЗЖРК в возрасте 90 дней отмечался начальный рост крупных иголок благодаря наличию тонких фракций -0,074 мм. Но такой рост – медленный процесс, который значительно превышает срок отработки смежной камеры.

Учитывая извилистую поверхность вертикального обнажения закладки и наличие гидросиликатного геля в структуре массива, его устойчивость будет слабой, что приведет к частичным обрушениям в отбитую руду.

Результаты исследования, приведенные в работах [56, 106], показывают, что области разрушения закладочного массива в основном располагаются от середины до кровли камеры. Имели место также обрушения бортов, верхних частей камер и вывалы кровли, являющейся днищем вышележащей камеры.

При обрушении кровли искусственного массива, сложенного из шлакопесчаной закладки, можно выделить две причины: технологическую и недостаточную проработку влияния химических компонентов на

устойчивость внутренних прочностных связей. К первой относится формирование заполнения первого слоя закладки в днище камеры. Ко второй – наличие слабоустойчивых структурных соединений. В составе закладки находилась значительная часть оксида кремния, достигающая 85 %. Однако в большем количестве при грубом помоле кремний плохо связывается в монолит, а также имеем дисбаланс соотношения CaO/SiO_2 . Обрушения в этажах 480 – 580 и 580 – 640 м происходили при закладочной смеси, состоящей из шлака, песка, воды.

Отработка запасов камер второй очереди сопровождается тем, что в боках заложенный массив камер первой очереди испытывает напряжения, превышающие предел его прочности на растяжение. Это вызывает необходимость упрочнения закладочного массива. Наибольшая интенсивность обрушений в очистное пространство приходится на верхнюю часть заложенных камер, так как кровлю камеры слагает конгломерат из руды, породы и закладки, а нижняя часть камер наиболее часто опирается на рудный массив, предел прочности на сжатие которого значительно выше.

Непостоянство химического состава и дисперсности закладочной смеси приводят к образованию разнопрочного закладочного массива как по площади камеры, так и по ее высоте. Под действием горного давления в закладочном массиве возникают крутящие моменты, которые приводят к его разрушению на контакте слоев, имеющих разную прочность.

Поэтому основной задачей заполнения камер первой очереди отработки является создание равномерного распределения прочности закладки по высоте для предотвращения вывалов закладочного массива. Учитывая технологические особенности заполнения закладочной смесью выработанного пространства большого объема, находящего в контакте с действующими горными выработками, достичь желаемого результата практически невозможно. Равномерного распределения прочности можно добиться только при строгом соблюдении однородной дисперсности вяжущего материала и однородности по составу твердеющей закладки в заполняемой области.

В настоящее время на шахте «Эксплуатационная» в этажах 640 – 740 и 740 – 840 м м применяется шлаково-известняковая закладка с добавлением пород из отвала. Одной из причин обрушения закладочного массива является использование крупнокусковой породы (до 40 мм) в закладке в момент заполнения днища камер. Для заполнения камер в этаже 640 – 840 м часто используют состав закладочной смеси с крупностью породы 40 мм и ее расходом до 570 кг/м^3 . Связывание этих частиц в единый монолит при существующей дисперсности в более короткие сроки невозможно, что способствует обрушению днищ заложенных камер.

Площадь взаимодействия тонких частиц с поверхностью частицы породы крупностью 40 мм требует намного больше времени, т. е. замедляется превращение закладочной смеси в монолит. Более быстрое схватывание закладочной смеси произойдет, если породу для заполнения закладочной смесью на высоту выпускных воронок измельчить до 10 мм. В зависимости

от конструкции днища камеры на его заполнение потребуется до 2000 м³ закладки, что вполне реализуемо в условиях комбината.

Для повышения прочности и устойчивости искусственного массива авторами предлагается изменять его структуру путем повышения дисперсности вяжущего в закладочной смеси с учетом возникающих напряжений вокруг высокой очистной камеры.

Если представить, что вокруг очистной камеры второй очереди находится закладочный массив, то поле напряжений проецируется на окружающий закладочный массив. По высоте закладочного массива формируются зоны разрушений от влияния напряжений камер первой очереди. Поэтому для повышения устойчивости и прочности закладочного массива достаточно изменить его структуру в определенной области под вид действующих напряжений (сжимающие, растягивающие).

Учитывая вышеизложенные причины неустойчивого состояния закладки к обнажению, авторами предлагается по высоте камеры изменять структуру закладки для повышения ее устойчивости, сопротивляемости сейсмическим нагрузкам и величине горного давления. Режим формирования закладочного массива в выработанном пространстве камер первой очереди должен учитывать возможные области концентрации напряжений при выемке запасов руды камер второй очереди.

Как установлено исследованиями авторов, закладочный массив, содержащий в своей структуре игольчато-волоконистые связи, устойчив к растяжению. Исходя из этого условия, в зонах формирования растягивающих напряжений по высоте камеры необходимо возводить закладочный массив игольчатой структуры. Это объясняется тем, что игольчатые связи распределяются в искусственном камне неопределенно, иглы и волокна взаимно пересекаются, что приводит к армированию твердеющей системы и повышению силы сцепления между кристаллами. Данная форма образуется при удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса свыше 4000 см²/г. Для предотвращения вывалов из верхних частей заложенных камер рекомендуется структуре закладочного массива придавать игольчатую форму связей.

При показателях удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса свыше 5500 см²/г в закладочном массиве формируются гидросиликаты кальция слоистого типа, их плотное и горизонтальное сложение устойчиво к нагрузке на сжатие. Данную структуру закладочного массива целесообразно формировать при заполнении выработанного пространства на уровне поэтажных выработок, а также по высоте областей сжимающих напряжений.

Повышение устойчивости закладочного массива камер первой очереди заключается в изменении его структуры в областях воздействия напряжений от влияния камер второй очереди.

Научные результаты, полученные в ходе исследований формирования структурных и прочностных особенностей закладочного массива, а также, распределения прочности закладки заложенных камер по высоте позволят

разработать рациональные технологические параметры твердеющей закладки – состав закладочной смеси, прочность, дисперсность компонентов, высота заполнения слоя закладки в камере – и дать рекомендации для технологии формирования закладочного массива этажа 840 – 940 м.

Применение закладочных смесей на основе мелкодисперсных частиц – это первый шаг перехода от твердеющей закладки к пастовой.

4.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КАМЕР ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Увеличение глубины ведения горных работ месторождения при камерной системе разработки с закладкой требует детальной проработки формирования качественного массива, которое зависит от состава применяемой смеси. Закладочный массив должен соответствовать нормативной прочности и быть однородным, плотным, содержать устойчивые внутренние связи. С увеличением расхода шлака возрастают затраты на закладочные работы, а прочность массива увеличивается незначительно.

На шахте «Эксплуатационная» оставшиеся запасы руды в этажах 640 – 740 м и 740 – 840 м разбатываются с формированием разнопрочного закладочного массива. В этажах, расположенных ниже необходимо предусматривать возведение закладочного массива одинаковой прочности или близкой к ней.

Для обоснования технологических рекомендаций применения твердеющей закладки на основе тонкодисперсных составов закладочной смеси были проанализированы геологическая характеристика вмещающих пород и руды в добываемых этажах, а также расчетные распределения прочности искусственного массива в заложенных камерах.

В этаже 840 – 1040 м в южной части залежи руды падение составляет 65 – 70°, а к северу угол падения достигает 80°. Эти показатели необходимо учитывать, так как при изменении угла падения с 70 до 80° коэффициент снижения концентрации напряжений изменяется на 0,6 [107]. В северной части залежи породы всяческого бока находятся под защитой слоев кварцита, что снижает нагрузку. Следовательно, нормативная прочность камер всяческого бока может быть снижена. Сланцы вмещающих пород и руда южной части залежи имеет меньшую крепость и устойчивость, поэтому здесь необходимо повысить прочность закладочного массива.

Искусственный массив камер первой очереди должен быть прочным и устойчивым ко всем нагрузкам, так как с севера и юга камеры второй очереди граничат с закладочным массивом. Его разрушения происходят под действием растягивающих напряжений, при этом предел прочности

закладки на растяжение составляет $0,06 - 0,1\sigma_{сж}$. Возведение однородного закладочного массива по площади и высоте выработанного пространства возможно при достижении однородной удельной поверхности доменного шлака и части известняка.

Основным технологическим параметром твердеющей закладки является прочность на одноосное сжатие в установленный срок. Прежде чем производить выбор состава твердеющей закладки, необходимо рассчитать и установить требуемую прочность, которая зависит от горно-геологических условий и порядка отработки очистных камер по рудной площади этажа.

Определение нормативной прочности закладки для отработки запасов руд висячем боку в этажах 640 – 740 – 840 – 940 м проводили на основе экспериментальной зависимости, полученной проф. В.П. Волощенко [74, 108]. Для расчета использовали следующие данные: значения средних глубин разработки $H = 690, 790, 890, 990$ м; коэффициент крепости пород висячего бока (сланцы) по Протодьяконову $f = 9$; мощность залежи $m = 90$ м; угол внутреннего трения пород висячего бока $\varphi = 25^\circ$; плотность пород висячего бока $\gamma = 2,6$ т/м³; коэффициент разгрузки напряжений $K_{рн} = 1,2$ (для камер висячего бока).

Выполненный расчет позволил установить зависимость изменения прочности твердеющей закладки от глубины разработки (рис. 4.1).

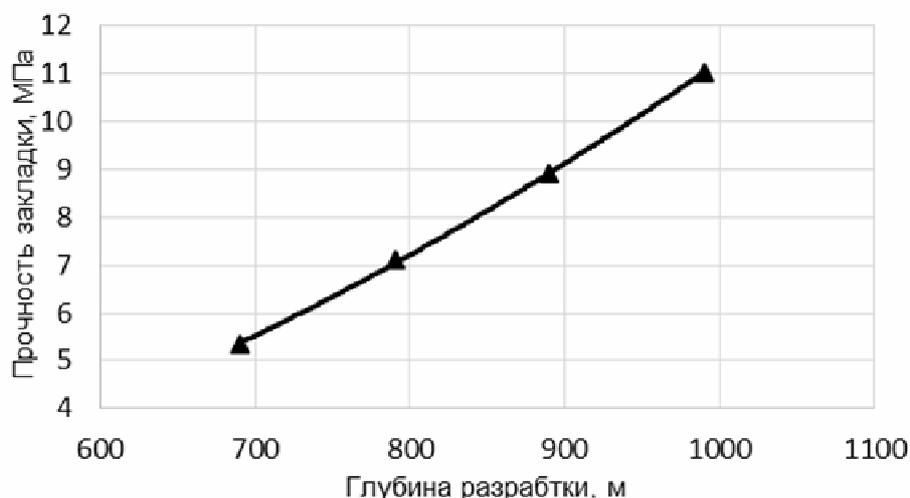


Рис. 4.1. Зависимость изменения прочности твердеющей закладки от глубины разработки

Как видно из графика для интервала глубин 690 – 990 м прочность твердеющей закладки изменяется по степенной зависимости и описывается эмпирическим уравнением вида

$$\sigma_{сж} = 0,00001H^{1,9929}, \text{ МПа}$$

где H – глубина заложения камеры первой очереди, м.

В перспективе разработки Южно-Белозерского месторождения находятся запасы руды в этаже 840 – 940 м, которые в настоящий момент активно

подготавливаются. Согласно рис. 4.1 нормативная прочность закладки для выемки руд у висячего бока составит не менее 8,9 МПа.

Одним из способов создания твердеющей закладки высокой прочности является добавка цемента или микронаполнителей, но это приведет к удорожанию закладочных работ.

На основе полученных результатов исследования о влиянии структурных связей в новообразованиях закладочной смеси, полученных при взаимодействии химических элементов в тонкодисперсных частицах вяжущего материала (рис. 3.8, 3.9), разработан график, позволяющий выбрать состав компонентов смеси для необходимой прочности твердеющей закладки (рис. 4.2).

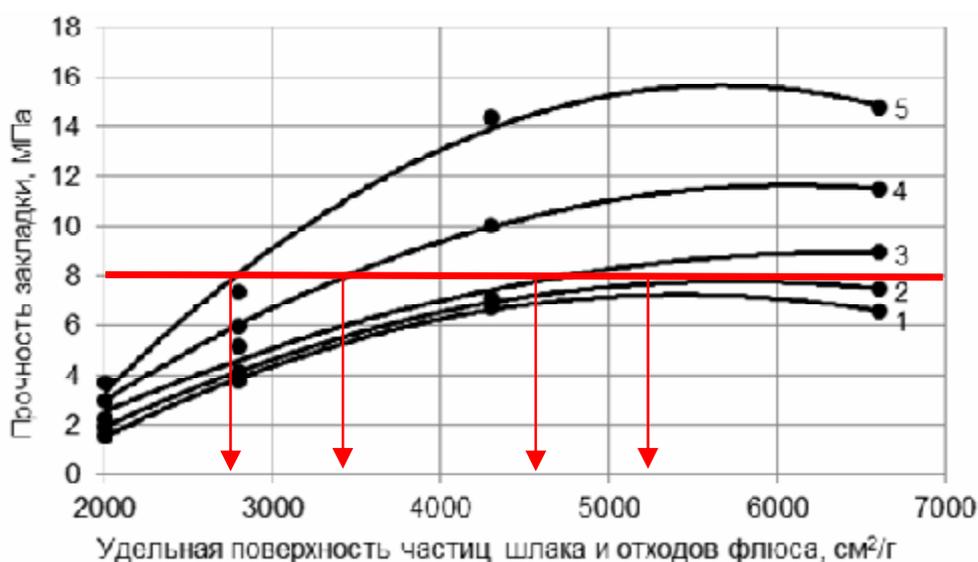


Рис. 4.2. Графики зависимости изменения прочности твердеющей закладки от удельной поверхности частиц при соотношениях «вяжущий материал – инертный наполнитель» соответственно: 1 – при 1:12,6; 2 – при 1:8,4; 3 – при 1:6,3; 4 – при 1:5,1; 5 – при 1:4,2

Из приведенных графиков на рис. 4.2 следует, что для достижения нормативной прочности закладки можно использовать разные составы, а также прогнозировать структуру закладочного массива. По величине удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса определяется тип структурных образований в закладочном массиве. Например, для получения однородного по прочности 8 МПа закладочного массива можно использовать несколько вариантов составов ($кг/м^3$): молотый шлак – 300, молотые отходы флюсового известняка – 150 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/г$), инертный наполнитель (известняк, порода) – 1550 или молотый шлак – 250, молотые отходы флюсового известняка – 125 ($S_{y\partial} = 3500 \text{ см}^2/г$), инертный наполнитель (известняк, порода) – 1625 и т.д. Выбор величины удельной поверхности определяется требуемой формой структурных связей. Варьируя этими параметрами появляется возможность формировать

разнопрочный закладочный массив, упрочняя только отдельные его области.

При необходимости получения сверхпрочного закладочного массива до 15 МПа можно использовать составы при расходе шлака 300 кг/м^3 с удельной поверхностью $S_{y\partial} = 4500 - 5000 \text{ см}^2/\text{г}$. С увеличением глубины разработки на каждые 100 м в составе твердеющей закладки нужно увеличивать содержание молотых вяжущих в среднем на 20 кг/м^3 .

Следует отметить, что приведенные составы формируют закладочный массив указанной прочности уже через 1 месяц твердения. Через 3 месяца показатель прочности возрастет на 20 – 30 %. Таким образом, можно подобрать время начала отработки камер, граничащих с заложеной для повышения интенсификации горных работ.

Увеличение удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса в твердеющей закладке сопровождается не только ростом прочности, но и изменением структуры. В табл. 3.8 указана форма новообразования при соответствующей удельной поверхности. Управление структурой твердеющей закладки является новым и важным технологическим решением в связи с увеличением глубины разработки.

Повышение устойчивости закладочного массива камер первой очереди возможно за счет обоснования рациональных параметров твердеющей закладки, на который оказывает влияние отработка камеры второй очереди. Как отмечают многие ученые [53, 58] на вертикальные обнажения закладочного массива воздействуют растягивающие напряжения. Для заложённых камер первой очереди этажа 840 – 940 м зона растягивающих напряжений будет образовываться в интервалах высот 930 – 910, 875 – 860 и 840 – 830 м, а сжимающие напряжения – в кровле и днище камер. Устойчивость кровли камер зависит от качества и состояния закладочного массива вышележащих камер этажа 775 – 825 м. Днище камеры находится в более устойчивом состоянии, так как оно располагается в рудном массиве.

Исходя из необходимой прочности закладки камер первой очереди и формирования устойчивых связей, искусственный массив в камере первой очереди, который в будущем будет окружать камеру второй очереди, рекомендуется возводить по схеме, представленной на рис. 4.3:

– днище камеры – высота заполнения 15 м (940 – 925 м), состав закладочной смеси (кг/м^3): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 110 ($S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 10,4 (11,5) МПа;

– очистное пространство камеры между поверхностью заполненного днища до подэтажа гор. 910 м – высота заполнения 15 м, состав закладочной смеси (кг/м^3): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 110 ($S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, вода – 400 л; прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 7 (9,2) МПа;

– подэтажи гор. 910 м – высота заполнения 5 м, состав закладочной смеси (кг/м^3): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

– 110 ($S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, вода – 400 л; прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 10,4 (11,5) МПа;

– подэтажи гор. 875, 840 м – высота заполнения каждого подэтажа 5 м, состав закладочной смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 110 ($S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, вода – 400 л; прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 7 (9,2) МПа;

– очистное пространство камеры между подэтажами в отметках 905 – 875, 870 – 845 м – высота заполнения каждого интервала 30 и 25 м, состав закладочной смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 110 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, вода – 400 л; прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 5,3 (7) МПа;

– очистное пространство камеры выше отметки 835 м до кровли гор. 825 м – высота заполнения 10 м, использовать состав закладочной смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$): молотый шлак – 220 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 110 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 940, порода – 542, вода – 400 л; прочность закладки в возрасте 30 (90) дней составит 5,3 (7) МПа.

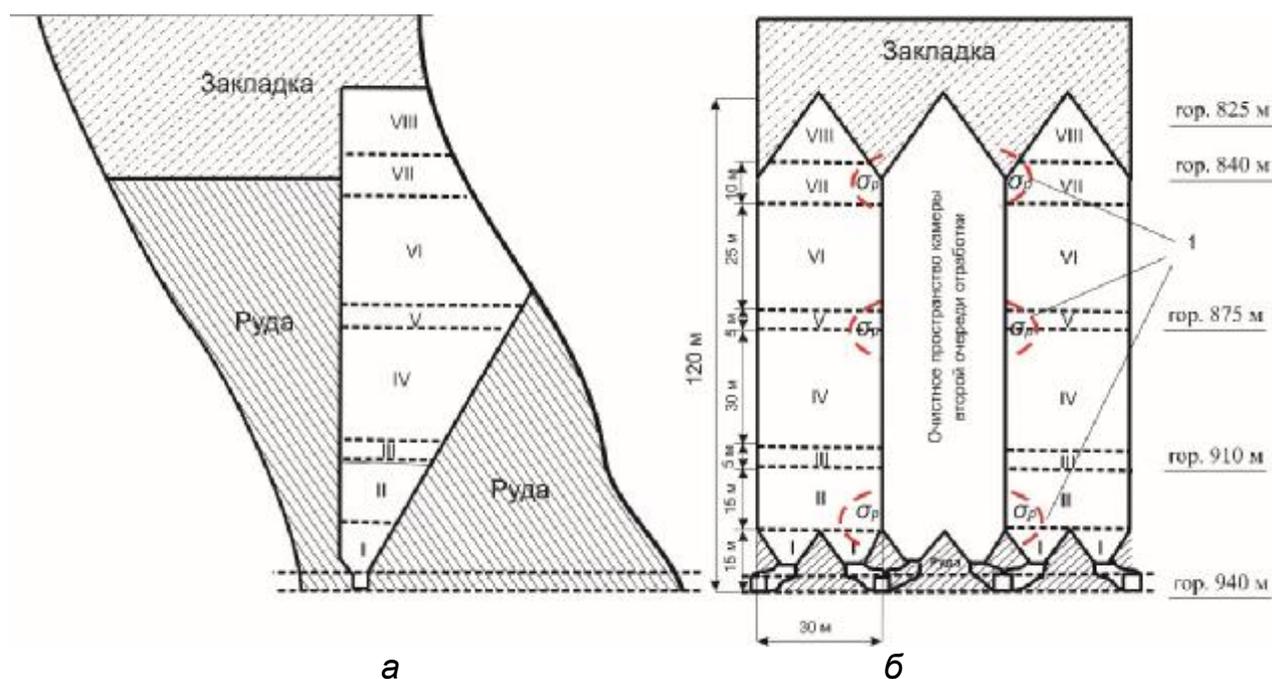


Рис. 4.3. Схема формирования закладочного массива камер первой очереди в этаже 840 – 940 м: а – вид вкрест простирания залежи; б – вид по простиранию залежи; 1 – области концентрации растягивающих напряжений [53, 58].

Таким образом по высоте камеры формируются упрочняющие пояса из мелкодисперсной закладки, содержащие игольчато-волокнустую и слоистую структуры.

Все рекомендованные составы закладочной смеси набирают прочность в течение 1,0 – 1,5 месяца. Рекомендованные технологические параметры для этажа 840 – 940 м представлены в табл. 4.1.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

При изменении параметров систем разработки в этаже 840 – 940 м принцип выбора упрочняющих областей закладочного массива остается прежним. Контролируются вывалы закладки по факту, уточняются области пониженной ее устойчивости, чтобы при отработке последующих камер сформировать прочный массив заданной структуры. При расчете параметров очистной камеры изменение прочности закладочного массива по высоте рекомендуется учитывать через коэффициент изменения прочности.

Таблица 4.1

**РЕКОМЕНДОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗАПОЛНЕНИЯ
ОТРАБОТАННЫХ КАМЕР ДЛЯ ЭТАЖА 840 – 940 М**

Область	Коэффициент отношения между высотами слоев закладки, м	$S_{уд}$, см ² /г	Состав закладочной смеси, кг/м ³	Прочность закладки в возрасте 30 (90) дней, МПа
I	$\frac{h_{он}}{H_k}$	5500	Ш-220, МОФ-110, ОФ-940, П-542	10,4 (11,5)
II	$\frac{h_{под} - h_{выр} - h_{он}}{H_k}$	4300		7 (9,2)
III, V, VII,	$\frac{h_{выр}}{H_k}$	4300		7 (9,2)
IV, VI, VIII	$\frac{h_{под}}{H_k}$	2800		5,3 (7)
VII	$\frac{h_{выр}}{H_k}$	4300		7 (9,2)

Примечание: Ш – шлак; МОФ – молотые отходы флюса; ОФ – отходы флюса, П – порода; $h_{он}$ – высота днища камеры, м; H_k – высота камеры, м; $h_{выр}$ – высота подэтажной выработки, м; $h_{под}$ – высота подэтажа, м.

При достижении прочности закладки 8,5 МПа величина разубоживания руды имеет минимальный показатель 1 – 1,5 % [108]. Учитывая преимущества мелкодисперсной закладки в отношении структуры и прочности, можно предположить, что следует ожидать снижение показателя разубоживания. Расположение упрочняющих слоев в верхней и нижней частях камеры, а также на уровне подэтажных выработок способствует разгрузке искусственного массива.

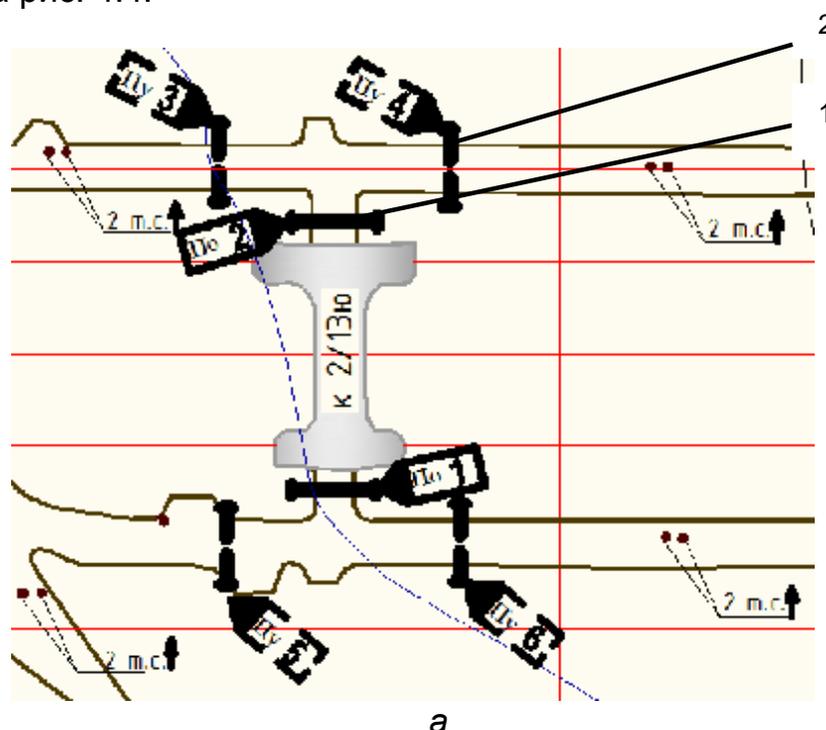
Запасы, расположенные в потолочине рудной залежи и обрабатываемые в этаже 301 – 330 м, рекомендуется заполнять следующими составами (кг/м³): молотый шлак – 150 ($S_{уд} = 2800$ см²/г), молотые отходы флюса – 75 ($S_{уд} = 2800$ см²/г), отходы флюса – 975, порода – 612. При данной дисперсности создаются условия роста остроугольной и

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

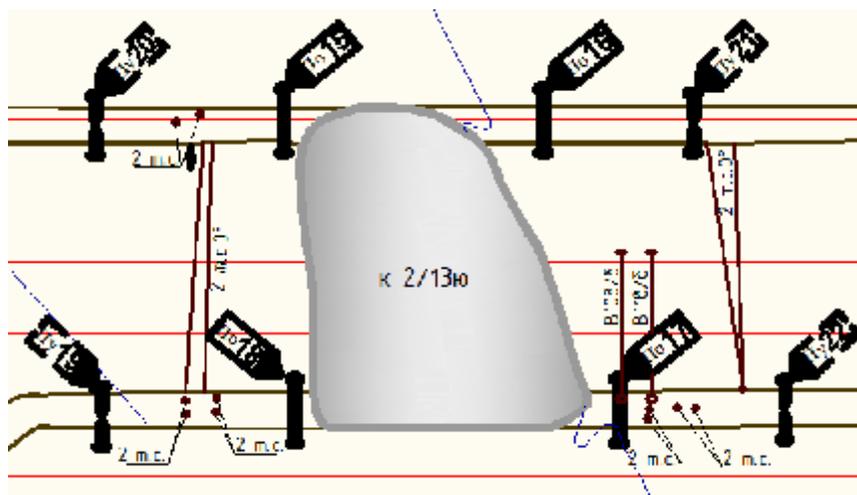
крупноигольчатой формы гидросиликатных связей. Эта структура по устойчивости превосходит гелеобразные структуры, которые наблюдаются при $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ (традиционный состав закладки). С меньшим расходом доменного шлака в составе закладочной смеси повышается устойчивость искусственного массива. Обнажения закладочных массивов при отработке запасов потолочины незначительные, поэтому вывалов практически не наблюдается.

Во вторичных камерах и изолированных залежах прочность не регламентируется. Очистное пространство этих камер рекомендуется заполнять составами ($\text{кг}/\text{м}^3$): молотый шлак – 100 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), молотые отходы флюса – 50 ($S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$), отходы флюса – 1000, порода – 662. Данный состав обеспечит прочность 3,8 – 4,0 МПа в первом месяце твердения и 5 – 6 МПа в возрасте трех месяцев.

Подготовка очистной камеры к закладке включает сооружение основных (изолирующие) и предохранительных (улавливающие) перемычек, примыкающих к очистной камере, необходимых для дренажа воды и защиты горных выработок от проникновения закладочного раствора. Для изоляции выработанного пространства используют пневматические, деревянные, бетонные и железобетонные перемычки. Последние, как правило, используют в сложных горно-геологических условиях, когда формируется закладочный массив значительных размеров из медленно твердеющих смесей. Места установки перемычек после отработки очистных камер (на примере к. 2/13ю эт. 715 – 840 м) в примыкающих горных выработках приведены на рис. 4.4.



ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

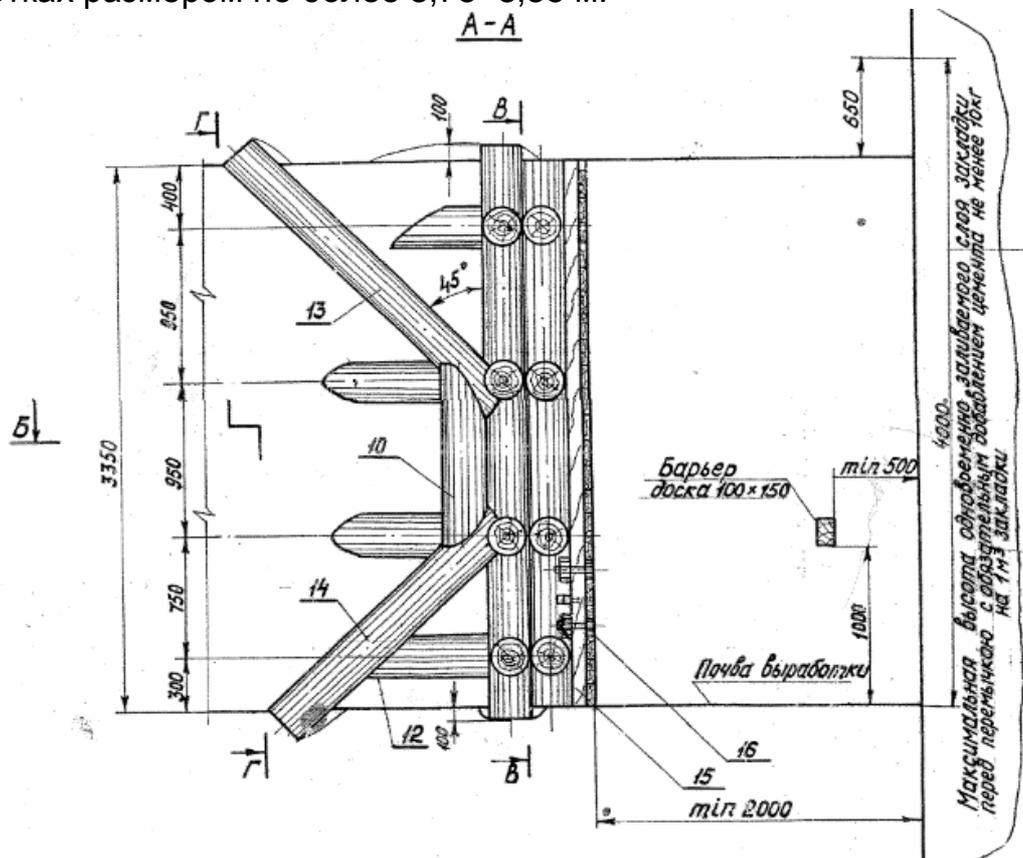


б

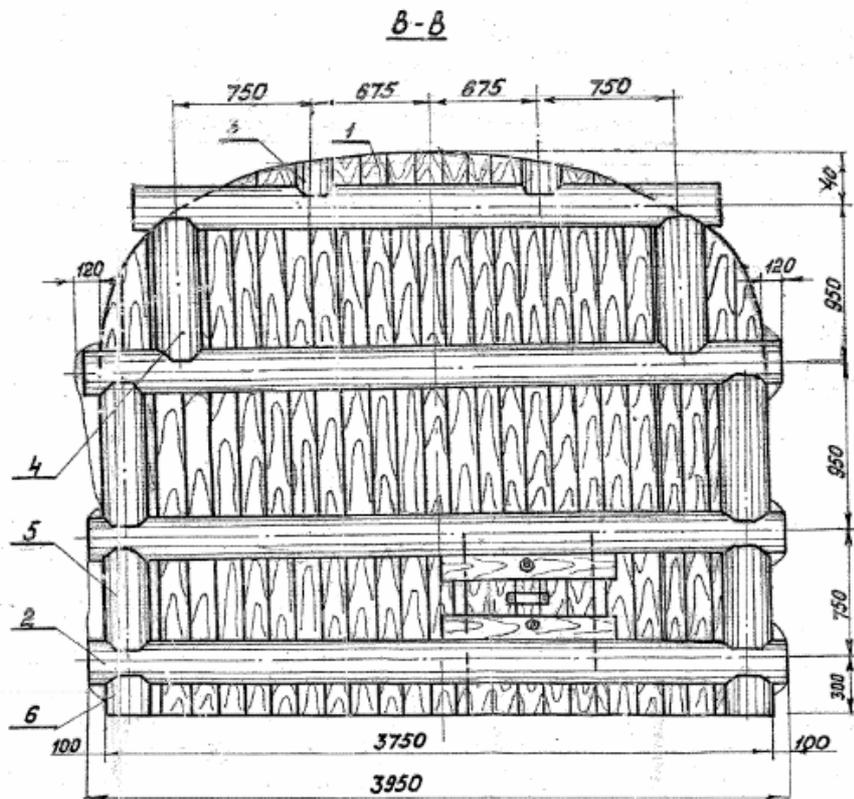
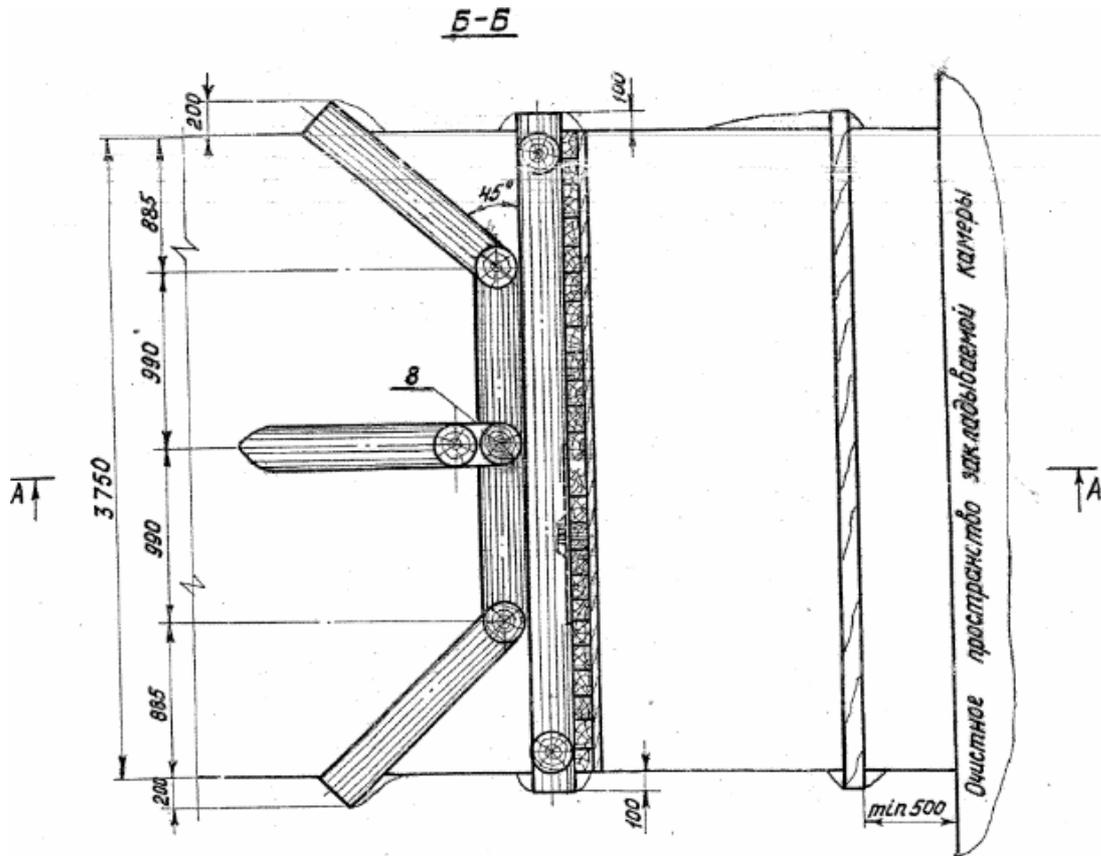
Рис. 4.4. Места установки основной (1) и предохранительной перемычек (2) на откаточном (а) и подэтажный горизонтах (б).

В процессе изоляции очистного пространства камеры применяются деревянные перемычки, деревянные перемычки на бетонном основании, бетонные и железобетонные перемычки, пневмобалонные перемычки. При подэтажно-камерной системе разработки с твердеющей закладкой нарезные подэтажные выработки чаще всего изолируются деревянными перемычками.

Деревянные перемычки (рис. 4.5) применяются, как правило, в горных выработках размером не более 3,75×3,35 м.



ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ



**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

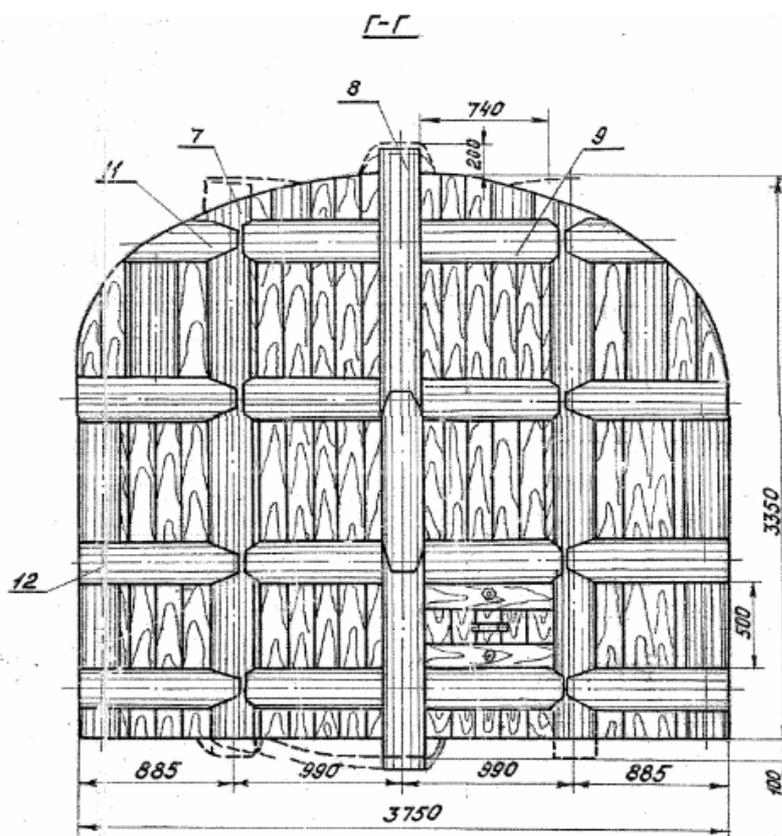


Рис. 4.5. Конструкция изолирующей деревянной перемычки: 1, 2 – прогоны; 3, 4, 5, 6, 10 – распорки; 7, 8 – стойки; 9 – расстрел; 11, 12, 13, 14 – подкосы; 15 – бруски; 16 – доски.

При заполнении камеры водоприток должен быть не более $10 \text{ м}^3/\text{ч}$. Коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодяконова – не менее $f = 3$, высота укладываемого слоя закладочной смеси – не более 4 м от основания. При ее сооружении используется сосна или ель.

Технология сооружения перемычки описана далее. В бортах, почве и кровле выработки разделяются штробы и лунки для закрепления концов прогонов, стоек и подкосов. Основная опорная рама устанавливается из прогонов (1, 2) и распорок (3, 4, 5, 6).

Затем вплотную к основной опорной раме крепится дополнительная упорная рама перемычки. Три стойки (7, 8) устанавливаются в лунки с распором. Между собой стойки расклиниваются расстрелами (9). В качестве основного упора крайние стойки распираются в борта выработки, а средняя стойка – в кровлю и почву выработки подкосами (11, 12, 13, 14). Подкосы средней стойки расклиниваются между собой распоркой (10). После установки прогонов, стоек и подкосов их концы, заходящие в лунки и штробы, должны быть надежно расклинены. К основной опорной раме со стороны очистного пространства крепится оградительный щит, состоящий из ряда брусков толщиной 100 мм (15) и ряда досок толщиной 40 мм (16), расположенных перпендикулярно друг к другу. Первый слой оградительного

щита из брусков принят как несущий и фильтрационный, второй из досок – только как фильтрационный.

Перпендикулярно к прогонам по направлению от стенок выработки к оси выработки крепятся гвоздями бруски первого слоя щита толщиной 100 мм (15). К этому слою в случае наличия значительных неплотностей между брусками рекомендуется по всей площади брусков со стороны очистного пространства набивать дренирующий экран из суровой брезентовой парусины. Фильтрующий экран из парусины не должен пропускать через себя частицы закладки размером более 0,01 – 0,02 мм.

Для создания лабиринтного уплотнения к прибитым брускам крепится второй слой щита из досок толщиной 40 мм (16), которые укладывают снизу вверх. Между крайней и средней стойками снизу перемычки оставляется проем размером 750×1050 мм (для лаза размером 750×500 мм), который закрывается лядой размером 750×1050 мм. Толщина брусков из досок в ляде и расположение их относительно друг друга должно соответствовать элементам оградительного щита.

Для исключения течи закладки в местах примыкания оградительного щита перемычки к поверхности выработки должны быть проконопачены ветошью. При необходимости их промазывают цементным раствором марки не ниже 200. Общий вид установки деревянной изолирующей перемычки в шахтных условиях представлен на рис. 4.6.

Перемычки сооружаются в первую очередь на нижних этажах и подэтажных выработках камеры-блока. Перемычки, служащие для удержания закладки, должны сооружаться за линией, проведенной от нижней границы камеры под углом $\beta+10^{\circ}=87^{\circ}$. По данным отработки камер с твердеющей закладкой на ЗЖРК с вероятностью 80 % угол $\beta=77^{\circ}$.



Рис. 4.6. Вид деревянной изолирующей перемычки в подземных условиях

На подэтаже после начала закладочных работ перемычки должны сооружаться за зоной, которая определяется линией, проведенной от границы камеры на уровне отфильтрованной закладки под углом $\beta+10^0=87^0$, но не ближе 2 м от границы камеры. Место установки предохранительной перемычки относительно основной принимается с таким расчетом, чтобы между ними могло поместиться не менее 100 м³ закладки [74].

Изолирующая перемычка рассчитывается на восприятие нагрузки только от закладки, которая подчиняется законам гидравлики.

Условием прочности перемычки является

$$s_{факт} \leq [s] \quad (4.1)$$

где $s_{факт}$ – фактическое напряжение в элементах перемычки, МПа;

$[s]$ – допускаемое напряжение в элементах перемычки, МПа,

$$[s] = \frac{R}{k}, \text{ МПа} \quad (4.2)$$

где R – расчетное напряжение для данного материала, т/м²;

k – коэффициент запаса прочности,

$$k = \frac{n \cdot k_0}{m \cdot m_e}, \quad (4.3)$$

где n – коэффициент перегрузки;

k_0 – коэффициент запаса прочности;

m – коэффициент условий работы;

m_e – коэффициент условий работы конструкций, проверяемых только на длительные нагрузки.

Указанные коэффициенты принимаются согласно СНиП 11-М-4-65.

Деревянные перемычки на бетонном основании применяются в горных выработках размером не более 4,5×4,5 м при аналогичной крепости пород. Высота укладываемого слоя закладочной смеси от ее основания не более 5 м.

Бетонные и железобетонные перемычки используют при водопритоке более 10 м³/ч при любых размерах горных выработок. Для укладки в опалубку перемычки применяют бетон марки М 200. Состав бетона: цемент, песок, щебень, вода в соотношении 1:1,75:3:0,6. Высота одновременно укладываемого слоя определяется в соответствии с сечением выработок. При прочности ниже проектной высоту заливки уменьшают пропорционально понижению прочности.

При использовании рекомендаций по возведению закладочного массива из тонкодисперсных частиц вяжущего материала фильтрующий экран перемычки не должен пропускать частицы менее 10 мкм.

Из изложенного можно сделать вывод, что формирование игольчато-волокнутой или слоисто-пластинчатой структуры твердеющей закладки определяется нормальными напряжениями по контуру закладочного массива в камерах первой очереди отработки рудных запасов. Это позволит закладочному массиву работать в режиме заданных нагрузок, снизить вероятность разубоживание руды и сократить расходы на выполнение закладочных работ.

Вследствие использования разработанных технологических параметров величины дисперсности, состава и прочности твердеющей закладки, а также принимая во внимание порядок заполнения твердеющей закладкой выработанного пространства, снизятся объемы разрушения закладочного массива при отработке камер второй очереди.

Необходимый объем упрочнения первичной камеры высокодисперсными составами закладки (при $S_{y\partial} = 4300 - 5500 \text{ см}^2/\text{г}$) составит 40 % от объема заполняемых пустот.

Таким образом, устойчивость закладочного массива в конструктивных элементах очистных высоких камер первой очереди достигается при следующей структуре закладки: слоисто-пластинчатая – днище, подэтажные горизонты; игольчато-волокнустая – сопряжения боков камер с днищем и кровлей. Это позволит предотвратить разрушения закладочного массива при выемке камерных запасов второй очереди и уменьшить разубоживание руды закладкой.

Возможность использования твердеющей закладки на основе мелкодисперсных частиц ограничивается возможностью выбора технологического оборудования отечественного производства.

4.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА

В лабораторных условиях ЗЖРК авторы исследовали влияние высокодисперсного доменного шлака и флюсового известняка ($S_{y\partial} = 2000 - 6600 \text{ см}^2/\text{г}$) на прочность и реологические свойства закладочных смесей, а также структуры закладочного массива при различном дисперсном состоянии частиц. Результаты исследования показали эффективность увеличения удельной поверхности шлака и части известняка в составе закладочной смеси для повышения качества искусственного массива.

Основой разработки составов твердеющей закладки является развитие формы и прочности связей закладочного массива при показателях измельчения доменного шлака и отходов флюсового производства 2800, 4300, 5500 $\text{см}^2/\text{г}$. Достоинство разработанных авторами составов твердеющей закладки на основе мелкодисперсных частиц наряду с

высокими показателями прочности – сокращение расхода доменного шлака на 25 – 75 %, упрочнение внутренних образований закладочного массива, а также увеличение доли породы в смеси.

В настоящее время на подземных рудниках СНГ технологией ведения закладочных работ предусматривается одностадийная схема измельчения вяжущего материала с получением конечного продукта крупностью 50 – 60 % частиц $-0,074$ мм, что соответствует удельной поверхности частиц $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ при среднем диаметре 35 – 40 мкм.

Критерием разработки технологической схемы получения тонкодисперсного вяжущего материала удельной поверхности 2800, 4300, $5500 \text{ см}^2/\text{г}$ служит конечная крупность продукта, которая составляет при максимальной удельной поверхности частиц исследуемых составов закладочных смесей $5500 \text{ см}^2/\text{г}$ 15 мкм. Достижение продукта указанной крупности в условиях технологических схем, действующих на закладочных комплексах рудников СНГ, возможно только путем совершенствования схемы измельчения.

Для полного раскрытия вяжущих свойств доменного гранулированного шлака и части отходов флюсового производства, а также улучшения структурно-прочностных свойств закладочного массива предлагается использование двухстадийной схемы измельчения (рис. 4.7).

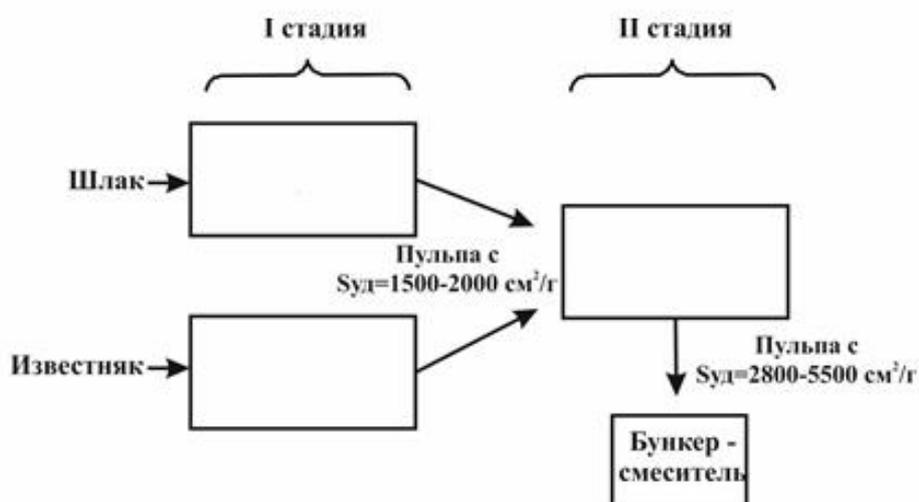


Рис. 4.7. Двухстадийная схема измельчения шлака и отходов флюса для приготовления твердеющей закладки

Технология дифференцированного заполнения очистных камер тонкодисперсной смесью для производства закладочных работ требует суточного измельчения шлака и отходов флюса в количестве 1150 т. Шаровая мельница МШЦ-36-55 № 1 предварительно измельчает исходные (до 10 мм) фракций доменного гранулированного шлака, шаровая мельница № 2 аналогичного типа измельчает часть отходов флюса (50 % от расхода шлака). Указанные мельницы доводят компоненты закладки до крупности 55 – 60 % частиц класса $-0,074$ мм, что соответствует удельной поверхности

2000 см²/г. Далее предварительно измельченный шлак и известняк пульпой поступают в мельницу второй стадии. Вторая стадия осуществляет доизмельчение шлака и отходов флюса до требуемой дисперсности. В нашем случае необходима вариация удельной поверхности шлака и отходов флюса в пределах трех режимов 2800 – 5500 см²/г для формирования необходимых структурно-прочностных свойств в закладочном массиве.

Оператор мельницы второй стадии, варьируя дисперсностью вяжущих материалов, осуществляет формирование закладочного массива требуемой структуры и прочности. Для надежного качественного контроля пульпы, состоящей из сверхтонких фракций, в лаборатории контроля свойств закладочной смеси предлагается использовать зерновой анализатор MULTISIZER-3, который позволяет за короткий промежуток времени (до 5 мин) получать диаграммы распределения классов фракций измельченного материала с высокой достоверностью. Это даст возможность контролировать содержание необходимых тонких фракций в пульпе.

При возведении закладочного массива камер первой очереди его часть в объеме 68 % (все пространство между подэтажами) рекомендуется заполнять закладочной смесью с удельной поверхностью вяжущего материала 2800 см²/г (все пространство между подэтажами), 24,3 % (подэтажи, упрочняющие слои) – с удельной поверхностью 4300 см²/г, 7,7 % (днище) – с удельной поверхностью 5500 см²/г. Применение двухстадийной схемы измельчения снижает затраты на расход вяжущих материалов.

Так, в этаже 840 – 940 м для заполнения камеры 1/3ю необходимо уложить 102,6 тыс. м³ закладочной смеси (запасы камеры 375 тыс. т, объемный вес руды – 4 т/м³, усадка закладочного массива 7 – 10%). При этом количество измельчаемого вяжущего материала с расходом 500 кг/м³ снижается с 51710 до 36936 т, или в 1,39 раза. Дифференцированное заполнение камеры закладкой разной удельной поверхности делает процесс сверхтонкого измельчения эффективным, так как в объеме выработанного пространства камеры количество высокодисперсного доменного шлака (4300 – 5500 см²/г), на разрушение которого требуется больше всего энергии, незначительно (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ОБЪЕМ РАЗНОДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ ЭТАЖА 840 – 940 М
ОБЪЕМОМ 100 ТЫС. М³**

Расход молотых шлака и отходов флюса в закладочной смеси, т/м ³	Количество молотых шлака и отходов флюса на заполнение, т	Удельная поверхность вяжущего материала, см ² /г		
		2800	4300	5500
		Количество шлака и отходов флюса на камеру, т		
0,36	36936	25116,48	8975,448	2844,072

Выполненные исследования влияния дисперсности вяжущего материала на свойства закладочной смеси показали, что перспективным направлением развития закладочных работ является применение сверхтонкого измельчения. Это достигается применением мельниц нового технического уровня типа Vertimill, SMD (США) и IsaMill (Австралия) в цепи аппаратов измельчения закладочной смеси в горнорудной промышленности за последние десятилетия. Они относятся к шаровым и галечным мельницам, но имеют принципиально разные физические и кинематические основы достижения необходимого класса дробления. Разработаны и также успешно применяются шаровые мельницы типа VM компании Metso, которые могут послужить заменой устаревших шаровых мельниц первой стадии.

Шаровые мельницы модели VM. Особенности шаровых и галечных мельниц [109]:

- шаровые мельницы используются с металлической средой;
- галечные мельницы используют с керамической средой и средой из естественных пород;
- тонкое измельчение происходит в одну стадию, а при необходимости доизмельчения реализуется вторая стадия в схемах двухстадийного измельчения.

Основные характеристики:

- размеры от 1,5×2,4 м с двигателем мощностью 55 кВт, а 9,0×12,5 м – 22000 кВт;
 - крупность питания 80 % до -6 мм или мельче для крепких руд, 80 % - 25 мм или мельче для более мягких руд;
 - типичная крупность конечного продукта 40 мкм и мельче.
- Общий вид мельницы представлен на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Общий вид шаровой мельницы модели VM в производстве

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Шаровые и галечные мельницы работают либо в открытом, либо в замкнутом цикле. Работа в открытом цикле возможна, когда:

- предусмотрена последующая стадия измельчения;
- требуемая степень измельчения невелика;
- материал питания уже мелкий и для получения желаемого результата достаточно одного прохода через мельницу;
- крупность продукта не критична и присутствие в нём недоизмельчённого материала допустимо.

Там, где важен контроль крупности конечного продукта, наиболее эффективным методом работы является измельчение в замкнутом цикле. Получение продукта высокого качества с низкими затратами оправдывает дополнительные капиталовложения.

Измельчение руд и других материалов осуществляется до типичной крупности конечного продукта 40 мкм и мельче. Параметры мельнице приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЯДА ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ МОДЕЛИ ВМ [110]

Модель (параметр)	Диаметр/ ширина барабана, м	Объем, м ³	Вход, мм	Продукт (P80), мм	N _{дв} , кВт	Габариты, мм
1	2	3	4	5	6	7
Metso ВМ 2,0 x 2,4	2,0/2,4	8	-20	≥ -0,040	110	3600x3000x3800
Metso ВМ 3,2 x 4,6	3,2/4,6	36	-20	≥ -0,040	600	6300x5000x5800
Metso ВМ 4,0 x 5,2	4,0/5,2	65	-20	≥ -0,040	1100	7000x6200x7100
Metso ВМ 5,0 x 7,3	5,0/7,3	140	-20	≥ -0,040	3000	9800x7800x8800
Metso ВМ 5,5 x 8,8	5,0/8,8	210	-20	≥ -0,040	4500	11600x9000x10100
Metso ВМ 6,1 x 10,2	6,1/10,2	300	-20	≥ -0,040	6700	13300x10800x11700

Основные преимущества:

- более 100 лет опыта эксплуатации в горной отрасли;
- экономия энергии благодаря автоматизации процесса;
- программное обеспечение разработано для самых сложных циклов и комплексных руд.

Мельницы типа Vertimill. Принцип работы мельниц VERTIMILL – мелющие тела перемешиваются шнеком с верхней подвеской и двухзаходной спиралью (мешалкой) (рис. 4.9, а).

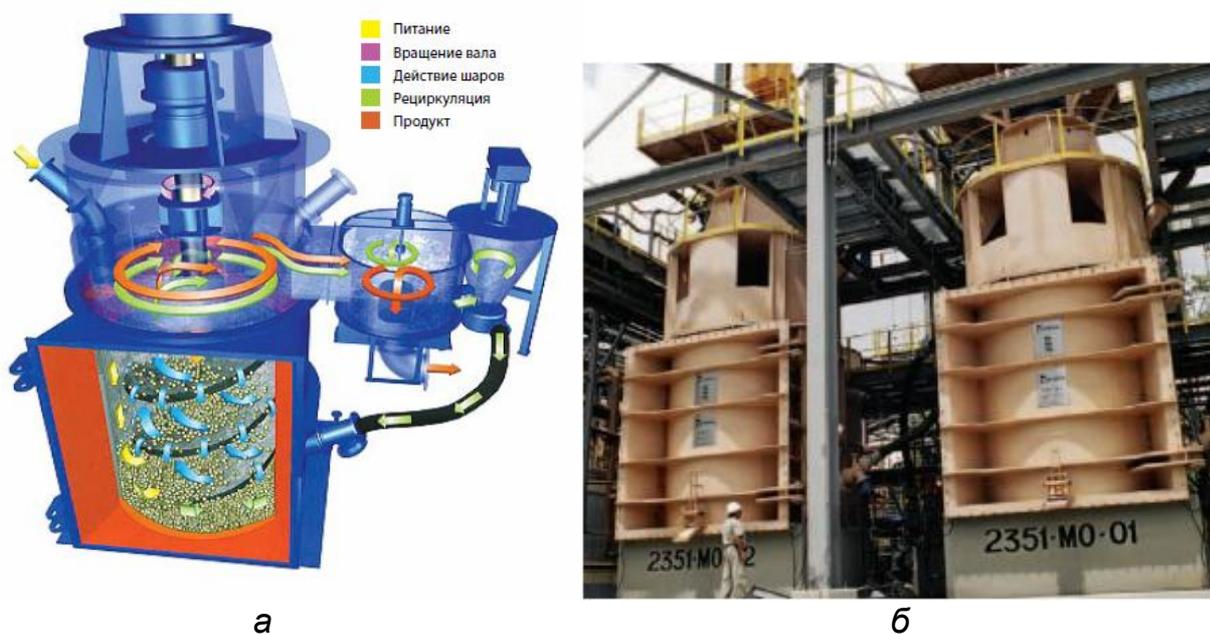


Рис. 4.9. Схема работы мельницы Vertimill (а) и размещение мельниц модели VTM-3000-WB в производстве (б) [111]

Материал для дробления и вода подаются в верхней части мельницы. Циркуляционный насос, установленный снаружи мельницы, обеспечивает заданную скорость восходящего движения пульпы и классификацию частиц в верхней части рабочей камеры. Предварительное разделение с удалением мелочи, имеющей крупность готового продукта, способствует избеганию вероятности чрезмерного измельчения и повышению эффективности работы мельницы. Нижняя часть мельницы, за исключением небольшого участка под спиралью шнека, заполнена мелющими телами. В качестве мелющих тел используют стальные шары, глубина слоя их составляет от 1,8 до 2,4 м. Шаровая загрузка захватывается шнеком и поднимается вверх, откуда она затем падает вниз в пространство между краями спирали шнека и внутренними стенками корпуса мельницы.

Пульпа перетекает из корпуса мельницы в камеру пульподелителя, который снабжен сферической задвижкой и регуляторами, разделяющими пульпу на два потока – рабочий и циркуляцию. Расход потока, возвращаемого на рециркуляцию, устанавливается таким образом, чтобы для каждого обрабатываемого материала обеспечить оптимальную скорость восходящего потока в корпусе мельницы. Рабочий поток либо является уже готовым продуктом, либо направляется на внешнюю систему классификации.

Измельчение материалов в мельницах типа Vertimill позволяет на 30 – 50 % сэкономить электроэнергию. Установлена зависимость изменения энергозатрат шаровых мельниц от степени измельчения (рис. 4.10). На питании до 6 мм и продуктах мельче 20 мкм мельница VTM марки Metso работает эффективнее шаровых мельниц.

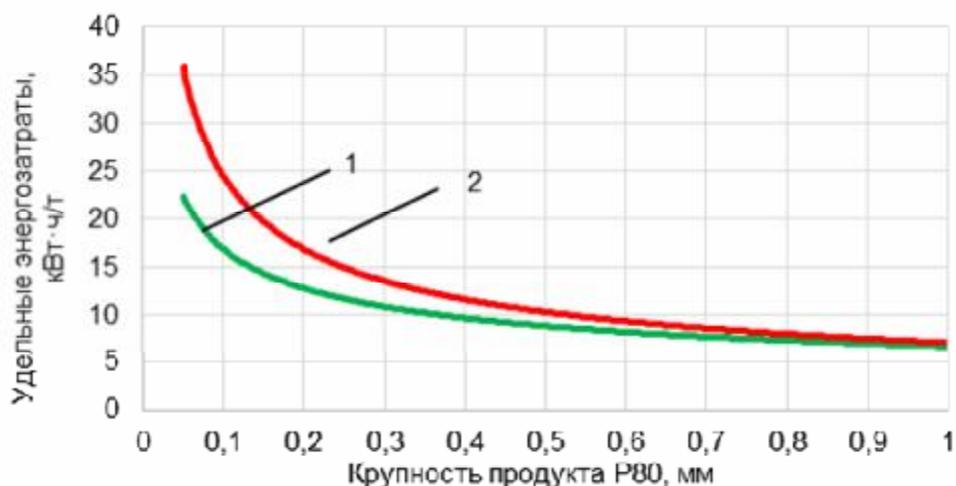


Рис. 4.10. Зависимость удельных энергозатрат от крупности продукта для шаровой (1) и мельницы Vertimill (2) [109]

Важной технологической особенностью конструкции мельницы VERTIMILL является то, что повышающаяся в мельнице скорость регулируется насосом рециркуляции для воздействия на гранулометрический состав продукта, а также предотвращения переизмельчения и снижения циркулирующей загрузки циклона. Благодаря этому можно варьировать крупностью конечного продукта. Опыт эксплуатации действующих вертикальных мельниц в циклах тонкого и ультратонкого измельчения показал их преимущества в сравнении с обычными шаровыми мельницами [112]:

- возможность тонкого (десятки микрометров) и сверхтонкого (единицы и доли микрометра) измельчения самых разнообразных материалов;
- примерно в 2 раза меньше удельные расходы электроэнергии на измельчение;
- экономия мелющих тел до 35 %;
- материал в вертикальной мельнице измельчается более избирательно (селективно), практически отсутствует переизмельчение;
- экономия эксплуатационных расходов.

Более 20 вертикальных мельниц используется в Японии для измельчения известняка в системах десульфурации газов. Крупность питания материала, подаваемого в мельницу, составляет -0,5 мм. Получаемый продукт составляет 95 % класса -0,044 мм. Затраты электроэнергии при этом, будут в половину меньше, по сравнению с обычной шаровой мельницей [112].

На заводе Cowal флотационный концентрат доизмельчают до 80 % класса -15 мкм. Максимальная эффективность измельчения достигается при двухстадийном режиме: в I стадии – шаровая мельница Metso Vertimill, во II – мельницы SMD. При производительности узла доизмельчения 90 т/ч, крупности флотационного концентрата 80 % класса -150 мкм расход

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

электроэнергии составляет 13,9 кВт·ч/т [113]. Технические характеристики

мельниц представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВОГО РЯДА МЕЛЬНИЦ ТИПА VERTIMILL

Модель (параметр)	N _{дв} , кВт	Среда, кг	Вес мельницы, кг		Q, м ³ /ч	Длина, м	Ширина, м	Высота, м
			пустой	полной				
VTM-15-WB	11	3409	7272	11127	5	1191	911	6985
VTM-20-WB	15	4545	7272	12091	7	1191	911	6985
VTM-40-WB	60	7260	7960	17350	14	1778	1778	7572
VTM-60-WB	45	7260	7960	17350	20	1778	1778	7847
VTM-75-WB	56	9797	11750	24400	25	1960	1705	9085,8
VTM-125-WB	93	18144	17068	41471	42	2667	2311	8629
VTM-150-WB	112	18144	21047	45450	51	2667	2311	8629
VTM-200-WB	149	18144	21047	45450	68	2667	2311	9458
VTM-250-WB	186	29030	29257	72575	85	3276	2645	8961
VTM-300-WB	224	29030	29257	72575	102	3277	2845	10353
VTM-400-WB	298	34930	44525	94350	135	3912	3912	11202
VTM-500-WB	373	44450	53120	121560	169	3658	3048	11957
VTM-650-WB	485	58970	79340	150600	220	4039	3556	12257
VTM-800-WB	597	78018	87090	198084	271	4064	3785	12381
VTM-1000-WB	746	86180	119160	249390	339	4270	3940	13061
VTM-1250-WB	932	90720	122470	269370	423	4528	4350	13711
VTM-1500-WB	1119	127005	143305	377840	508	5385	4547	14655
VTM-3000-WB	2237	277599	342753	792240	1016	3683	6604	17948

Мельницы типа SMD с перемешиванием измельчающей среды. Конструкция SMD-мельницы содержит восьмигранный корпус, внутри которого установлен механизм многолопастной мешалки, приводимой в действие электродвигателем и редуктором с косозубой зубчатой передачей (рис. 4.11). Корпус служит также опорой для приводной системы. На верхней части корпуса мельницы установлено несколько секций полиуретановых просеивающих поверхностей, имеющих клиновидный профиль. Они служат для удержания измельчаемой среды внутри мельницы и для разгрузки измельченного продукта. Количество секций просеивающих поверхностей и размер их ячеек выбирается исходя из требуемой крупности выходного продукта и конкретных рабочих условий. Шлам подается в мельницу через впускной штуцер, установленный на верхней части корпуса, а затем поступает в зону измельчения SMD-установки.

Измельчаемая среда также подается сверху через фланцевый штуцер (при пневматической загрузке) либо через загрузочную точку (при механической загрузке). Измельченный материал, прошедший через

просеивающие поверхности, собирается во внешнем разгрузочном желобе и поступает на следующую установку технологической линии [114, 115].

На руднике Рого (производительность 2500 т руды в сутки) золотосодержащий флотационный концентрат измельчают до -10 мкм перед его цианированием (по методу «уголь в пульпе»). Перед измельчением концентрат гидроциклонировать: класс -75 мкм направляют на выщелачивание, а пески – на последовательное доизмельчение в двух мельницах SMD. По данным испытаний, расход электроэнергии на доизмельчение концентрата до крупности -10 мкм составляет около 60 кВт·ч/т [113].

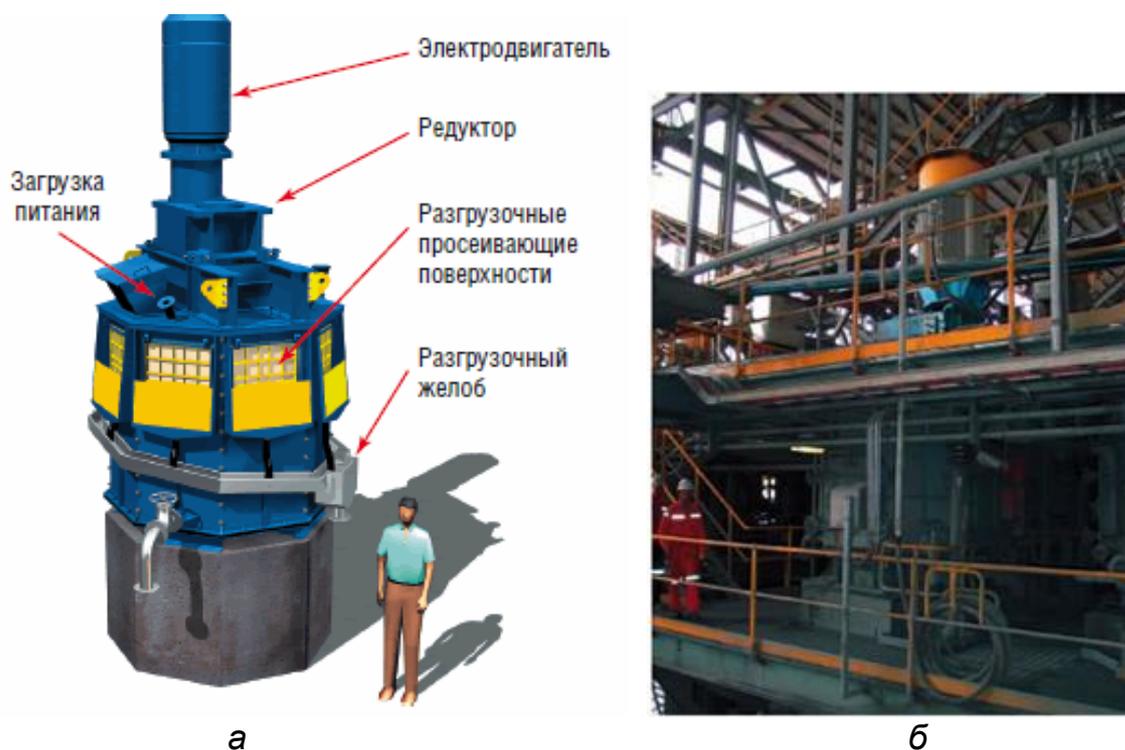


Рис. 4.11. Конструкция мельницы SMD-185-E (а) и вид мельницы типа SMD-355-E в производстве (б) [114]

При эксплуатации мельниц SMD достигается энергоэффективность, особенно при измельчении до 10 мкм, а свыше – энергозатраты резко возрастают (рис. 4.12). Технические характеристики мельниц представлены в табл. 4.5.

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

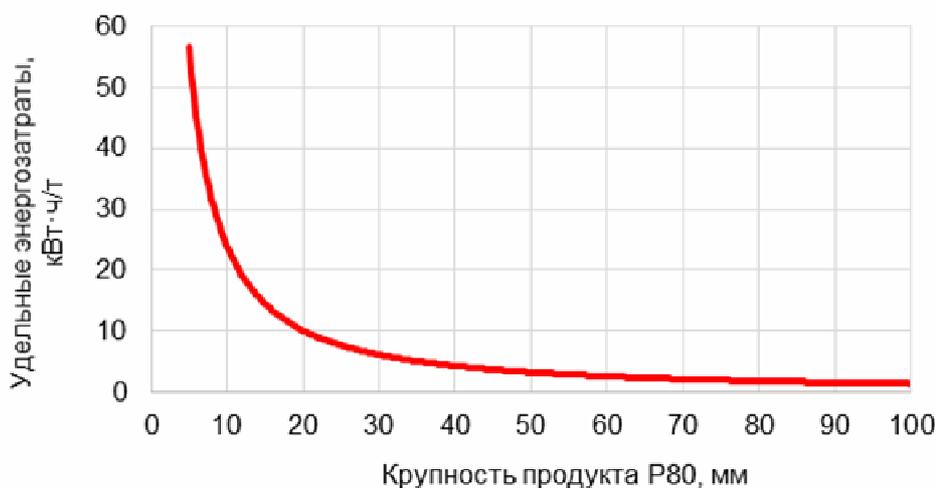


Рис. 4.12. Зависимость удельных энергозатрат от крупности продукта при использовании мельниц SMD [115]

Таблица 4.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВОГО РЯДА МЕЛЬНИЦ ТИПА SMD

Модель (параметр)	Р _{дв.} , кВт	Среда, кг	Вес мельницы, кг		Q м ³ /ч	L, м	B, м	H, м
			пустой	полной				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SMD-0,75L	0,75	2	400	400	-	1071	480	1215
SMD-7,5-P	7,5	125	1500	1950	21	1262	1399	2213
SMD-18,5-P	18,5	300	2100	2900	43	1282	1837	2393
SMD-90-E	90	1500	4020	10500	60	2130	2130	4215
SMD-185-E	185	3000	7590	19750	115	2511	2511	4659
SMD-355-E	355	6000	15500	31000	115	3050	3050	6498
SMD-1100-E	1100	18000	44500	79000	225	4600	4600	8400

Основные преимущества мельниц:

- эффективное сверхтонкое измельчение и энергоэффективность;
- достигается более тонкий помол при меньших энергозатратах, чем в классических шаровых мельницах;
- инертная измельчающая среда; пульпа не загрязняется железом;
- минимальный шум – менее 85 Дб;
- низкие операционные затраты за счет малоподвижных частей и низкой стоимости измельчающей среды и изнашиваемых частей;
- высокий коэффициент использования оборудования;
- вертикальная конструкция – малая занимаемая площадь;
- низкие затраты на установку;
- безопасность эксплуатации;
- эксплуатационная гибкость;
- простое обслуживание.

Мельницы с перемешиванием мелющей среды IsaMill. IsaMill™ [116] – это самая энергоэффективная и интенсивная из промышленных мельниц, предлагаемых на рынке. Она позволяет снизить потребление энергии, компактна (меньше шаровых и башенных мельниц аналогичной производительности), отличается простотой монтажа и обслуживания. Основное применение мельниц: доизмельчение концентрата, тонкое или сверхтонкое измельчение, основное измельчение. Схема компоновки мельницы приведена на рис. 4.13. Мельница состоит из восьми последовательных камер измельчения и сепаратора, который обеспечивает короткое время пребывания продукта и четкое распределение продукта по классам крупности без внешней классификации.

IsaMill™ является закрытой мельницей. Пульпа проходит мельницу в режиме идеального вытеснения через последовательно расположенные диски измельчения. Среда рециркулирует между вращающимися дисками, распределяя действие измельчения по объему IsaMill™. Измельчение происходит за счет истирания при взаимодействии с мелкой быстроциркулирующей средой. Такой режим разрушения позволяет получать очень тонкий продукт при относительно низком расходе энергии.

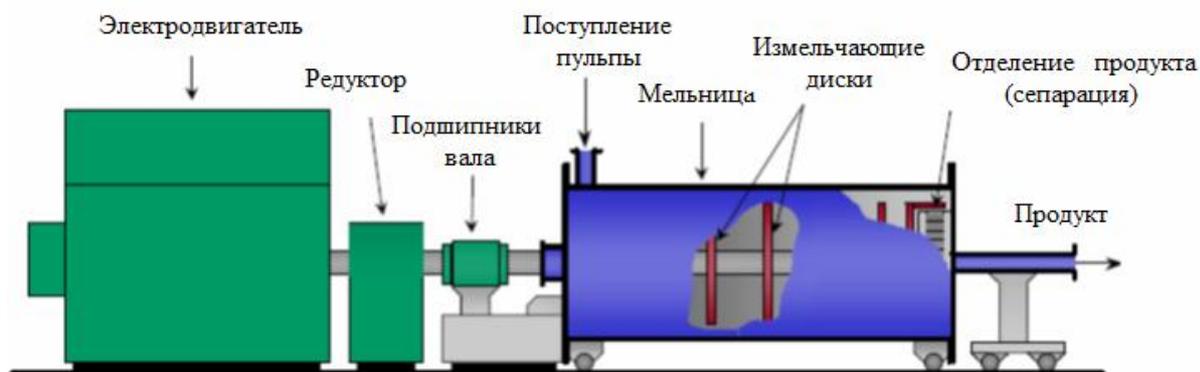


Рис. 4.13. Конструкция мельниц IsaMill

На стороне разгрузки IsaMill™ пульпа и среда поступают в патентованный сепаратор продукта. Среда возвращается под действием центробежной силы к корпусу и перекачивается с частью пульпы на сторону питания. В результате среда остается в IsaMill™ без использования тонких грохотов, а измельченная пульпа выходит через центр сепаратора.

Высокая эффективность IsaMill™ обусловлена возможностью использования мелкой среды, обладающей большой площадью поверхности и высокой частотой соударений между средой и частицами питания.

Расположение мельницы IsaMill M3000 на руднике «МаунтАйза», Австралия (а) и мельницы IsaMill M10000 в компании «PanAust», Лаос (б) представлены на рис. 4.14 [116, 117]. На рис. 4.15 приведена зависимость удельных энергозатрат от крупности продукта при измельчении.

При крупности материала $-0,074$ мм свыше 90 % удельный расход энергии составляет 9,1 кВт·ч/т, в то время как шаровые мельницы

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

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 [118].



Рис. 4.14. Расположение мельницы IsaMill M3000 (а) и IsaMill M10000 (б) в производственных условиях (б)

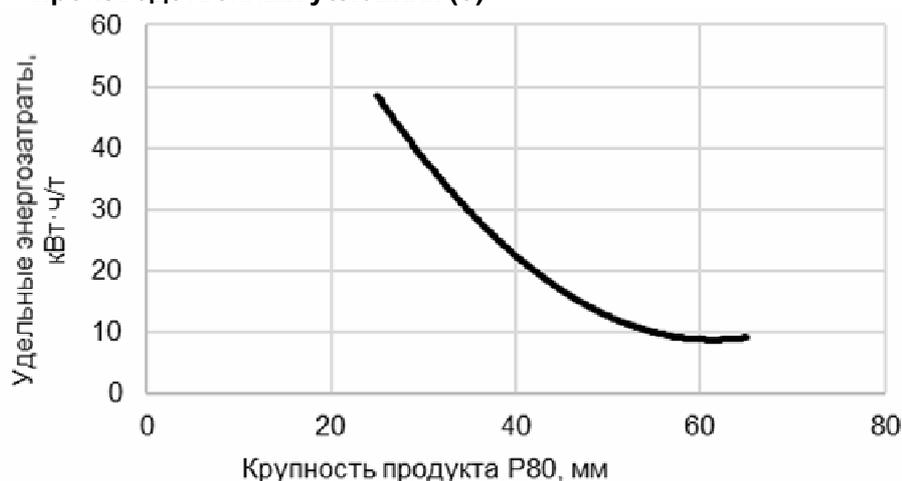


Рис. 4.15. Зависимость удельных энергозатрат от крупности продукта при использовании мельниц IsaMill [118]

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 % с последующим магнитным обогащением и с завершающим измельчением до 34 мкм в мельнице IsaMill [119]. Экономится около 60 МВт мощности (40 % от общей мощности и ~50 % мощности для этапа измельчения) по сравнению с одностадийным циклом шаровой мельницы. Технические характеристики мельниц представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЬНОГО РЯДА МЕЛЬНИЦ ISAMILL

Модель (параметр)	Объем камеры, л	Р _{дв.} , кВт	Масса, кг	Длина, м	Ширина, м	Высота, м

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

1	2	3	4	5	6	7
M1000	1000	500	13500	10000	1400	1200
M3000	3000	1120	25000	16000	3500	2700
M5000	5000	1500	30000	18000	3500	2700
M10000	10000	3000	62000	22000	3500	3400
M50000	46000	8000	126000	34000	4700	5400

Мельница IsaMill M3000 может работать с производительностью до 90 т/ч. Основные преимущества мельниц IsaMill:

- энергоэффективность;
- высокая интенсивность – малая занимаемая площадь;
- распределение продукта по классам крупности;
- простота, высокая скорость и безопасность техобслуживания;
- горизонтальная конструкция (режим идеального вытеснения);
- низкие затраты на установку.

Применение мельницы IsaMill и двухстадийной схемы измельчения является новым этапом для совершенствования технологии закладочных работ. Так, можно повысить эффективность применения твердеющей закладки при разработке рудных месторождений, снизить расход доменного шлака, количество и объем вывалов, разубоживания руды, увеличить прочность искусственного массива.

Применение закладочных смесей из тонкодисперсных вяжущих материалов рекомендуется при отработке мощных месторождений богатых руд цветных и черных металлов системами разработки с твердеющей закладкой и значительной производственной мощностью горного предприятия.

4.4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАПОЛНЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КАМЕР ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Для приготовления твердеющей закладки на основе тонкодисперсных вяжущих частиц в технологической цепи закладочного комплекса рекомендуется использовать мельницы модели IsaMill M5000, которые обладают достаточной производительностью (до 90 т/ч), могут достигать крупности конечного продукта до 5 мкм ($6000 \text{ см}^2/\text{г}$) и способны 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 выходного продукта (рис. 4.16).

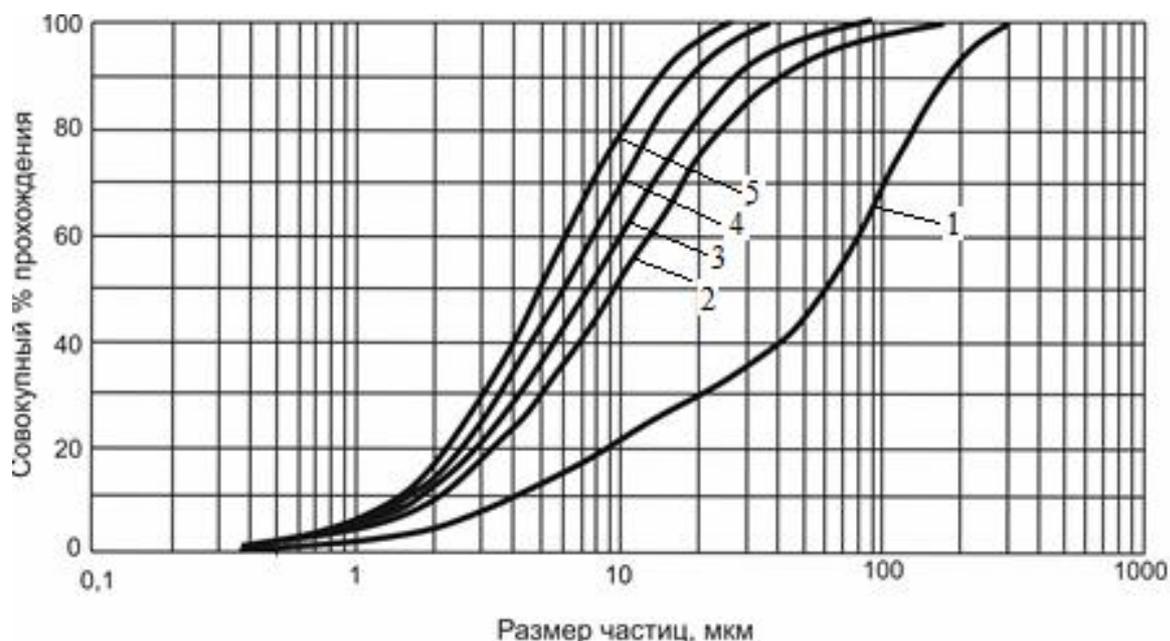


Рис. 4.16. График распределения крупности частиц при измельчении в мельнице IsaMill в зависимости от расхода электроэнергии, кВт·ч/т [109]: 1 – подаваемый продукт (55 – 60% частиц -0,074 мм); 2 – 20; 3 – 36; 4 – 57,4; 5 – 79,1

Графики показывают, как с возрастанием тонкости измельчения изменяется процент прохождения частиц и удельные энергозатраты. Подаваемый материал в мельницу IsaMill при эксперименте (рис. 4.16) имеет крупность 55 – 60 % частиц класса -0,08 мм, что приближено к значению тонкости измельчения шаровой мельницы в условиях закладочного комплекса ЗЖРК. Получаем из графика ориентировочные удельные энергетические затраты трех режимов измельчения во второй стадии согласно рекомендациям табл. 4.1: $S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г} - 10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, $S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г} - 17 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, $S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г} - 35 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$.

Затраты на измельчение шлака в шаровых мельницах закладочного комплекса ЗЖРК при паспортной производительности составляют 13,1 кВт·ч/т. В результате снижения расхода шлака на камеру нагрузка на шаровые мельницы в первой стадии уменьшится, что повлечет за собой снижение энергозатрат. Данные контроля тонкости помола шлака в шаровых мельницах закладочного комплекса показывают широкий разброс в получении частиц крупностью -0,074 мм от 46 до 57 % и свидетельствует о проблематичности достижения однородной крупности частиц. Этот фактор оказывает прямое влияние на формирование закладочного массива с однородной прочностью, которое возможно при одинаковых показателях дисперсности шлака и постоянном химическом составе.

Для расчета экономического эффекта предлагаемых рекомендаций сравниваем два варианта приготовления твердеющей закладки с одностадийным (базовый вариант) и двухстадийным (рекомендуемый вариант) измельчением вяжущего материала. Основным критерием экономической эффективности принята стоимость компонентов твердеющей

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

закладки как главная статья затрат при производстве закладочных работ и стоимость энергозатрат на измельчение вяжущего материала.

В базовом варианте отработанная камера средним объемом 102,6 тыс. м³ заполняется на высоту 120 м с расходом доменного шлака 590 кг/м³ (с учетом влажности) при его удельной поверхности до 2000 см²/г, отходами флюса – 910 кг/м³, горной породой – 620 кг/м³.

Рекомендуемый вариант включает заполнение камеры твердеющей закладкой (согласно табл. 4.1) объема камеры с удельной поверхностью доменного шлака и части отходов флюса (50 % от расхода шлака) 2800 см²/г – 69,67 тыс. м³, 4300 см²/г – 24,98 тыс. м³, 5500 см²/г – 7,95 тыс. м³ следующим составом закладочной смеси (кг/м³): доменный шлак – 240, молотые отходы флюса – 120, отходы флюса – 1050, порода – 650.

С целью удешевления закладочных работ предлагается заменить часть дорогостоящих отходов флюса Докучаевского комбината отсевом известнякового щебня ПАО «ТБК» (Херсонская обл.) крупностью до 10 мм в количестве 0,2 т/м³, в связи с ограниченностью объемов добычи.

Расчет затрат на твердеющую закладку камеры первой очереди объемом 102,6 тыс. м³ с учетом материалов при базовом варианте сведен в табл. 4.7, а при рекомендуемом – в табл. 4.8.

Таблица 4.7

ЗАТРАТЫ НА ЗАКЛАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ БАЗОВОМ ВАРИАНТЕ

Компонент закладки	Стоимость 1 т, грн	Расход на 1 м ³ смеси, т	Расход на камеру, т	Затраты, грн.
Доменный гранулированный шлак	46,83	0,675*	69255	3243211,65
Отходы флюса	74,23	0,803*	82387,8	6115646,4
Дробленая горная порода	17,34	0,588*	60328,8	1046101,39
Цемент	1050	0,01**	203	213150
Всего				10618109,4

Таблица 4.8

ЗАТРАТЫ НА ЗАКЛАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ РЕКОМЕНДУЕМОМ СПОСОБЕ

Компонент закладки	Стоимость 1 т, грн	Расход на 1 м ³ смеси, т	Расход на камеру, т	Затраты, грн.
Доменный гранулированный шлак	46,83	0,24*	24624	1153141,92
Молотые отходы флюса	74,23	0,12*	12312	913919,76
Отходы флюса	74,23	0,65*	56430	4188798,9
Отсев известнякового щебня (Херсон)	39,9	0,2*	30780	1228122
Дробленая порода	17,34	0,58*	59508	1031868,72
Цемент	-	-	-	-
Всего				8868077,1

Примечание: * – расход материалов увеличен с учетом 12 % влажности; ** – цемент используется при заполнении днищ камер и подэтажных выработок в размере 10 кг/м³ от

**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

количества вяжущего материала (с цементом заполняется 15 – 20 % объема камеры в зависимости от размеров выработанного пространства).

Расчет энергетических затрат при базовом и рекомендуемом варианте:

а) при одностадийной схеме измельчения (базовый вариант) расход вяжущего материала на камеру составит 69255 т, стоимость 1 кВт – 0,9616 грн.

Определим удельные энергозатраты на измельчение граншлака до установленной крупности помола 55 % частиц -0,074 мм, что приблизительно соответствует величине удельной поверхности $S_{y\partial} \approx 2000 \text{ см}^2/\text{г}$.

$$E = N \cdot \delta \cdot k_{\text{в}} / Q, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$$

N – установленная мощность двигателя шаровой мельницы, кВт. $N = 1250$ кВт.

δ – коэффициент, учитывающий отношение потребляемой мощности к установочной, $\delta = 0,85 – 0,90$. Примем $\delta = 0,9$.

$k_{\text{в}}$ – коэффициент использования оборудования во времени. Определяется как отношение времени работы механизмов в сутки к количеству часов в сутки. По данным анализа работы мельниц коэффициент использования во времени можно принимать $k_{\text{в}} = 0,6 – 0,8$. Примем $k_{\text{в}} = 0,7$.

Q – производительность шаровой мельницы, т/ч. Паспортом мельницы при измельчении материала до установленной крупности помола 55 % частиц -0,074 мм предусматривается производительность 60 т/ч.

$$E = 1250 \cdot 0,9 \cdot 0,7 / 60 = 13,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$$

Вычислим стоимость электроэнергии на измельчение по формуле

$$C_l = q \cdot c \cdot Q, \text{ грн}$$

q – удельные затраты электроэнергии на измельчение, $q = 13,1$ кВт·ч/т;

c – стоимость 1 кВт электроэнергии, $c = 0,9616$ грн;

Q – количество измельчаемого материала на закладку камеры, $Q = 69255$ т.

$$C_l = q \cdot c \cdot Q = 13,1 \cdot 0,9616 \cdot 69255 = 872402,4 \text{ грн.}$$

б) при двухстадийной схеме измельчения (рекомендованный вариант) расход вяжущего материала на камеру составит 36936 т при $S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$, 8975 т при $S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$ и 2844 т при $S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$, стоимость 1 кВт – 0,9616 грн, удельные энергетические затраты на измельчение до $S_{y\partial} = 2800 \text{ см}^2/\text{г}$ – 5 кВт·ч/т, $S_{y\partial} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$ – 12 кВт·ч/т, $S_{y\partial} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$ – 30 кВт·ч/т.

Вычислим стоимость электроэнергии на измельчение для I стадии:

$$E_I = 13,1 \cdot 0,9616 \cdot 36936 = 465281,3 \text{ грн.}$$

Стоимость электроэнергии на измельчение для II стадии:

$$E_{II} = (5 \cdot 0,9616 \cdot 25081) + (12 \cdot 0,9616 \cdot 8992,8) + (30 \cdot 0,9616 \cdot 2862) = \\ 120589,4 + 103769,7 + 82562,9 = 306922 \text{ грн.}$$

Общая стоимость электроэнергии на измельчение при двухстадийной схеме составит

$$E_{\text{общ}} = 465281,3 + 306922 = 772203,3 \text{ грн.}$$

Таким образом, затраты на электроэнергию при двухстадийном измельчении могут быть снижены, чем при одностадийном на 9 %. Ожидаемый экономический эффект определяется из выражения

$$\mathcal{E} = V_2 - V_1, \text{ грн}$$

где V_2 – текущие затраты на компоненты твердеющей закладки и электроэнергию при измельчении, грн;

V_1 – затраты на компоненты твердеющей закладки и электроэнергию при измельчении после рекомендаций, грн.

Подставим числовые значения и получим

$$\mathcal{E} = V_2 - V_1 = 11490511,8 - 9640280,4 = 1850231,4 \text{ грн} \\ \text{или } 18 \text{ грн на } 1\text{м}^3 \text{ твердеющей смеси}$$

Использование предложенных технологических рекомендаций позволяет снизить стоимость закладочных работ по материалам и электроэнергии на одну очистную камеру первой очереди на 3,9 %. С увеличением прочности закладочного массива до 10 МПа в возрасте 180 дней повышается его устойчивость и снижаются показатели разубоживания с 4,5 % до 1,8 %, составляя разницу в 2,7 %. (рис. 4.17).

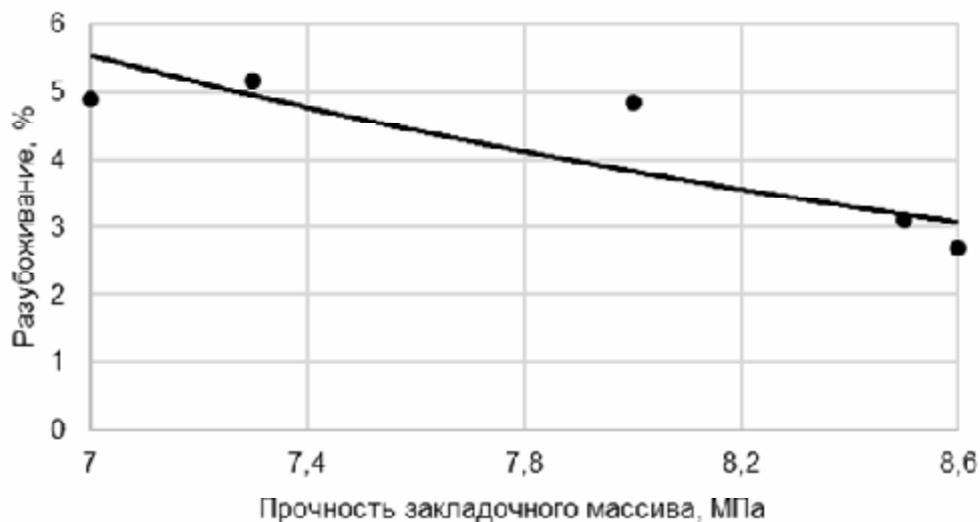
**ТВЕРДЕЮЩАЯ ЗАКЛАДКА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ КРУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Рис. 4.17. Зависимость разубоживания руды от прочности закладки для камер второй очереди отработки запасов лежачего бока

Убыток от попадания 1 % закладочного материала в добытую руду, сопровождающийся снижением в ней содержания железа составляет порядка 7,2 грн/т. Дополнительный экономический эффект от снижения разубоживания может составить $2,7 \cdot 7,2 = 19,44$ грн/т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография является законченным научным исследованием, в котором на основе новых установленных зависимостей изменения прочности, формы и химического состава структурных новообразований твердеющей закладки от удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса решена актуальная задача по определению технологических параметров формирования закладочного массива. Это позволит повысить его устойчивость на контуре камеры, предотвратить вывалы закладочного материала, свести к минимуму показатели разубоживания рудной массы.

В результате выполненных исследований получены следующие научные результаты:

1. Установлено, что степень измельчения вяжущих материалов, применяемая для твердеющей закладки при разработке рудных месторождений, не обеспечивает необходимой прочности закладки и требует создания структурных новообразований на микроуровне.

2. Предложена комплексная методика исследования дисперсности, минерального состава закладочного материала и новообразований на основе рентгенофазового и термического анализов, инфракрасной спектроскопии, растровой электронной микроскопии. Установлены основные факторы, влияющие на прочность твердеющей закладки - средний диаметр частиц доменного шлака и отходов флюса, их расход, форма и химический состав новообразований в процессе гидратации.

3. Установлено, что прочность закладки из мелкодисперсных частиц доменного шлака и отходов флюса изменяется по полиномиальной зависимости от их удельной поверхности и выражается эмпирическими уравнениями $\sigma = -4E-07S^2 + 0,0048S - 6,16$, ($R^2 = 0,96$) – для состава смеси при расходе шлака 100 кг/м^3 и отходов флюса 50 кг/м^3 ; $\sigma = -2E-07S^2 + 0,0026S - 0,95$, ($R^2 = 0,94$) – для состава смеси при расходе шлака 200 кг/м^3 и отходов флюса 100 кг/м^3 ; $\sigma = -9E-07S^2 + 0,0098S - 12,91$, ($R^2 = 0,97$) – для состава смеси при расходе шлака 300 кг/м^3 и отходов флюса 150 кг/м^3 . Это позволило установить предельную величину удельной поверхности $S_{уд} = 5500 \text{ см}^2/\text{г}$ в формировании структуры закладочного массива, выше которой прочность не возрастает.

4. Влияние удельной поверхности доменного шлака и отходов флюса на твердеющую закладку сопровождается изменением формы ее структуры: при $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ формируется гелеобразная, округлая структура новообразований, при $2800 \text{ см}^2/\text{г}$ – остроугольная, крупноигольчатая, при $4300 \text{ см}^2/\text{г}$ – игольчато-волоконистая, при $6600 \text{ см}^2/\text{г}$ – слоисто-пластинчатая. Дана количественная оценка приросту прочности твердеющей закладки при различной форме ее структуры: крупноигольчатая 1,8 – 2,5 раза, игольчато-волоконистая 3,1 – 3,5 раза, слоисто-пластинчатая – 3,1 – 4,5 раза.

5. Установлена степенная зависимость изменения основности новообразований гидросиликатов кальция в структуре закладки от удельной поверхности частиц шлака и отходов флюса ($\text{CaO/SiO}_2=124S_{\text{уд}}^{-0,52}$). Это позволяет изменять формы структуры закладки и повысить ее прочность на основе полученных химических формул новообразования закладочного массива.

6. Установлены зависимости прочности закладки от состава закладочной смеси и содержания частиц $-0,074$ мм. При содержании этих частиц до 55 % в закладочной пульпе и расходе шлака 550 кг/м^3 не достигается прочность массива свыше 8 МПа.

7. Установлено, что прочность закладки по высоте камеры изменяется по полиномиальной зависимости при концентрации вывалов на выпуклостях кривой контура камеры. Неустойчивые области массива совпадают с фактическими данными вывалов закладочного материала. Устойчивость закладочного массива определяется коэффициентом изменения его прочности в зависимости от высоты этажа.

8. Установлено, что в областях растягивающих нормальных напряжений закладочного массива необходимо формировать закладку игольчато-волоконистой структуры, а при сжимающих напряжениях – слоисто-пластинчатой.

9. Разработаны рекомендации параметров технологии формирования твердеющей закладки из мелкодисперсных вяжущих частиц шлака и отходов флюса при отработке запасов железной руды в этаже 840 – 940 м ЧАО «ЗЖРК», что позволяет сократить расход доменного шлака в 1,7 – 2,0 раза, повысить прочность закладки на 25 %. Ожидаемый экономический эффект от рекомендаций составляет 18 грн на 1 м^3 твердеющей смеси и до 20 грн/т добытой руды от снижения ее разубоживания с 4,5 % до 1,8 %.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Гошковский С.В. Минерально-сырьевая база Украины и реализация положений горной хартии стран СНГ / С.В. Гошковский // Горный журнал. – 2007. – № 10. – С. 69 – 76.
2. Кравченко В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / В.П. Кравченко, В.В. Куликов. – М.: Недра, 1974. – 200 с.
3. Петренко А.А. Разработка месторождений с опережающей выемкой богатых руд на большой глубине / А.А. Петренко, В.Г. Иванов. – М.: Недра, 1972. – 200 с.
4. Хомяков В.И. Зарубежный опыт закладки на рудниках / В.И. Хомяков. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
5. Стацилин И.Т. Опыт применения закладки на шахте «Магнетитовая» при отработке охранного целика / И.Т. Стацилин, Х.И. Анлюков // Горный журнал. – 1991. – № 11. – С. 32 – 34.
6. Исследование прочностных и деформационных свойств закладочного массива / Н.С. Кунанбаев, С.Н. Зеленцов, А.Б. Макаров и др. // Горный журнал. – 2001. – № 5. – С. 36 – 38.
7. Горнодобывающие предприятия. Государственное предприятие «Восточный горно-обогатительный комбинат [Электронный ресурс]/ Образовательно-научно-производственный портал «Рудана». – Режим доступа к статье: <http://www.rudana.in.ua/wostgok.htm>.
8. Богуславский Э.И. Технология восходящей отработки месторождений на больших глубинах / Э.И. Богуславский, Д.Ю. Минаев // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 2. – С. 161– 165.
9. Требуков А.Л. Применение твердеющей закладки при подземной добыче руд / А.Л. Требуков – М.: Недра, 1981. – 172 с.
10. Капленко Ю.П. Моделирование технологии очистной выемки, обеспечивающей повышение показателей извлечения руды / Ю.П. Капленко, В.А. Колосов. – Кривой Рог: Минерал, 2001. – 177 с.
11. Официальный сайт горно-обогатительного комбината «Химрудтех». – Режим доступа: <http://hymrudtex.ru/>
12. Волощенко В.П. Перспективы управления горным давлением на глубоких горизонтах / В.П. Волощенко // сб. науч. тр. НИГРИ. – Кривой Рог. – 1990. – С. 67 – 71.
13. Крупник Л.А. Закладочные смеси высокой плотности, их свойства и перспективы применения / Л.А. Крупник, Г.В. Соколов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 11. – С. 237 – 240.
14. Обоснование перехода от систем разработки с обрушением к системам с твердеющей закладкой / Б.П. Дробот, Б.К. Миняев, К.Н. Светлаков и др. // Горный журнал. – 1971.– № 1. – С. 37– 39.
15. Козаков М.О. О влиянии глубины разработки на себестоимость подземной добычи железных руд / М. Козаков // Горный журнал. – 1972. – № 9. – С. 24– 26.

16. Караев О.С. Нормирование прочности закладочных массивов при подработке / О.С. Караев, В.И. Голик, Ш.М. Магомедов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2002. – № 5. – С. 32 – 35.

17. Голик В.И. Оптимизация нормативной прочности твердеющих смесей при закладке пустот / В.И. Голик // Горн. информ.-аналит. бюл. – 1999. – № 3. – С. 70 – 72.

18. Крупник Л.А. Улучшение реологических характеристик твердеющих закладочных смесей и упрочнение закладочных массивов добавкой поверхностно-активных веществ / Л.А. Крупник, Н.П. Агапова, Р.С. Абдикалыкова // Вестник КазНТУ. – 2011. – № 2. – С. 34 – 38.

19. Аношин Г.Г. Совершенствование технологии добычи руды системами с закладкой на руднике «Северный» / Г.Г. Аношин, В.В. Степин // Горный журнал. – 1985. – № 2. – С. 28 – 29.

20. Малетин Л.В. Опыт развития и совершенствования технологии закладочных работ / Л.В. Малетин, О.Б. Осеев // Горный журнал. – 1991. – № 5. – С. 52 – 54.

21. Виноградов С.А. Технология приготовления и формирования закладочной смеси для Яковлевского рудника / С.А. Виноградов, В.И. Кутузов // Горный журнал. – 1991. – № 10. – С. 31 – 35.

22. Обоснование параметров систем разработки с применением твердеющей закладки / Б.А. Вольхин, Т.Н. Смирнова, А.И. Мохов и др. // Горный журнал. – 1970. – № 6. – С. 23 – 26.

23. Применение систем разработки с закладкой на медноколчеданных рудниках Урала / Ю.В. Волков, В.Ф. Булатов, И.В. Брезгулевский и др. // Горный журнал. – 1977. – № 5. – С. 30 – 32.

24. Основные направления совершенствования закладочных работ на рудниках Норильского ГМК / Э.Я. Григорьянц, А.И. Мохов, В.Т. Кравченко и др. // Горный журнал. – 1975. – № 8. – С. 26 – 29.

25. Имангалиев А.И. Технология получения твердеющей закладки в условиях Дзезказгана / А.И. Имангалиев, Н.А. Терентьев // Горный журнал. – 1972. – № 11. – С. 30 – 32.

26. Напоровски З. Использование хвостов обогатительных фабрик для закладки выработанного пространства на рудниках Польши / З. Напоровски, Г. Кендзерски // Горный журнал. – 1978. – № 9. – С. 73 – 75.

27. Калмыков В.Н. О возможности применения смешанного вяжущего на основе цемента и доменного гранулированного шлака ОАО «Северсталь» в закладочных смесях на нефтетитановой шахте Ярегского ГХК / В.Н. Калмыков, И.Т. Слащилин // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 1. – С. 182 – 187.

28. Монтянова А.Н. Обоснование составов твердеющей закладки для алмазодобывающих предприятий Якутии / А.Н. Монтянова // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2003. – № 5. – С. 41 – 44.

29. Крупник Л.А. Пути утилизации породы от проходческих работ на подземных рудниках / Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 5. – С. 200 – 201.

30. Ляшенко В.И. Научно-технические основы повышения безопасности жизнедеятельности в уранодобывающем регионе / В.И. Ляшенко, В.З. Дятчин, Ю.Н. Тархин // Научный вестник НГУ. – 2010. – № 2. – С. 7 – 14.
31. Бронников Д.М. Закладочные работы в шахтах / под. ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. – М.: Недра, 1989. – 400 с.
32. Выбор эффективной технологии подземной разработки сложных месторождений полиметаллических руд (на примере Рубцовского месторождения): материалы Уральской горнопром. декады, г. Екатеринбург, 14 – 23 апр. 2008 г. / оргкомитет: Н.Г. Валиев (отв. за выпуск) и др. – Екатеринбург: УГГУ, 2008. – 333 с.
33. Головнева Е.Е. К вопросу о рациональном использовании техногенного пространства гипсового месторождения в Донецкой области. / Е.Е. Головнева, С.В. Борщевский, Т.А. Ланская // Проблемы недропользования: сб. науч. тр. – С.-Пб. – 2010. – С. 154 – 156.
34. Шишкин В.И. Исследование вяжущих свойств хвостов обогащения в твердеющей закладке подземных рудников / В.И. Шишкин, И.С. Трубкин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 3. – С. 7 – 12.
35. Горбунова О.А. Разработка составов твердеющей закладки на основе отходов горно-обогатительного производства с добавкой полимеров класса полигексаметиленгуанидинов / О.А. Горбунова // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – Т. 2, № 12. – С. 62 – 69.
36. Трубкин И.С. Закладочные смеси для горных выработок с применением конвертерных шлаков ММК и хвостов обогащения медно-серных руд / И.С. Трубкин, А.А. Зубков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 3. – С. 12 – 14.
37. Хайрутдинов М.М. Выбор химических добавок для твердеющей закладки на калийных рудниках / М.М. Хайрутдинов, М.В. Вотяков // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2007. – № 6. – С. 218 – 220.
38. Вотяков М.В. Формирование высокопрочного закладочного массива при использовании в качестве активатора лигносульфоната / М.В. Вотяков // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 10. – С. 199 – 204.
39. Габараев О.З. Исследование состояния закладочного массива при различных свойствах твердеющей смеси / О.З. Габараев, Ш.М. Тугуз, О.В. Петрова // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 11. – С. 38 – 41.
40. Изыскание состава и технологии приготовления бесцементных закладочных смесей на основе известково-шлакового вяжущего / В.Н. Калмыков, И.С. Белобородов, В.В. Григорьев и др. // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 7. – С. 242 – 245.
41. Ермолович Е.А. Бесцементная закладочная смесь на основе техногенных отходов / Е.А. Ермолович // Научные ведомости. Сер. Естественные науки. – 2010. – № 9 (80), вып. 11. – С. 156 – 158.
42. Цветков В.В. Обоснование применения гидравлической закладки подземного выработанного пространства с использованием хвостов обогащения руд на Жезказганском месторождении / В.В. Цветков, В.А. Исаев // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2005. – № 7. – С. 5 – 8.

43. Гранхольм С. Разработка месторождений с закладкой: пер. с англ. / С. Гранхольм. – М.: Мир, 1987. – 519 с.
44. Таймасов Б.Т. Технология производства портландцемента: учеб. пособие. / Б.Т. Таймасов. – Шымкент: ЮКГУ, 2003. – 297 с.
45. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества: учеб. для вузов. / А. В. Волженский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
46. Курносоев С.А. Решение проблемы поддержания горных выработок, расположенных в слабых вмещающих породах / С.А. Курносоев, А.Т. Курносоев, И.Н. Слащев // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: сб. науч. тр. XIX междунар. науч. школы. – Алушта, 2009. – С. 187 – 190.
47. Русских В.В. Принятие новых технических решений при отработке рудных залежей в сложных горно-геологических условиях Южно-Белозерского месторождения / В.В. Русских, С.А. Зубко, В.И. Доценко // Школа подземной разработки: сб. науч. тр. IV междунар. науч.-практ. конф. – Д: НГУ, 2011. – С. 237 – 242.
48. Кузьменко А.М. К вопросу подбора состава твердеющей закладки повышенной прочности / А.М. Кузьменко, М.В. Петлёванный, Е.П. Чистяков и др. // Геотехническая механика: сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2009. – Вып. 82, т. 1. – С. 50 – 57.
49. Ляшенко В.И. Научно-технические основы природоохранных технологий подземной разработки урановых месторождений / В.И. Ляшенко, А.Х. Дудченко, А.А. Ткаченко // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2008. – № 4. – С. 34 – 42.
50. Усатый В.Ю. Обоснование параметров камер сложной формы второй очереди отработки запасов систем разработки с твердеющей закладкой: дис. ...канд. техн. наук: 05.15.02 / Усатый Владимир Юрьевич; Нац. горн. ун-т. – Д., 2011. – 145 с.
51. Голик В.И. Оптимизация нормативной прочности твердеющих смесей при закладке пустот / В.И. Голик // Горн. информ.–аналит. бюл. – 1999. – № 3. – С. 70 – 72.
52. Малый А.Н. Определение разубоживания руды твердеющей закладкой при отработке железорудных месторождений / А.Н. Малый, В.К. Щедрик, Г.Н. Кущенко // Горный журнал. – 1977. – № 5. – С. 34 – 35.
53. Кононенко М.М. Дослідження напружено-деформованого стану масиву навколо очисних камер / М.М. Кононенко // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 4. – С. 51 – 53.
54. Хоменко О.Є. Натурні дослідження поведінки масиву гірських порід навколо первинних очисних камер / О.Є. Хоменко, М.М. Кононенко // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 8. – С. 15 – 17.
55. Алдамбергенов У.А. Влияние напряженного состояния закладочного массива на устойчивость его вертикального обнажения / У.А. Алдамбергенов, Т.А. Осипова, Т.Д. Щербакова // Совершенствование

технологии добычи руд с закладкой на рудниках Казахстана: сб. науч. тр. – Алма-Ата, 1986. – С. 12 – 18.

56. Кузьменко А.М. Распределение напряжений в горном массиве вокруг высоких очистных камер при разработке рудных месторождений с твердеющей закладкой / А.М. Кузьменко, В.В. Усатый // Геотехническая механика: сб. науч. труд. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2010. – Вып. 94, т. 1. – С. 105 – 133.

57. Устойчивость высоких вторичных камер в окружении разномодульного массива при разработке железорудного месторождения / А.М. Кузьменко, Н.П. Уланова. В.В. Приходько и др. // Геотехническая механика: сб. науч. труд. ИГТМ НАН Украины. – Д., 2004. – Вып. 48. – С. 82 – 86.

58. Кузьменко А.М. Моделирование устойчивости формы высоких очистных камер при системах разработки железорудных месторождений с твердеющей закладкой / А.М. Кузьменко, В.Ю. Усатый, В.В. Усатый // Школа подземной разработки: сб. науч. тр. IV междунар. науч.-практ. конф. – Д: НГУ, 2011. – С. 30 – 38.

59. Цыгалов М.Н. Разработка месторождений полезных ископаемых с монолитной закладкой / М.Н. Цыгалов, Д.Э. Зурков. – М: Недра, 1970. – 176 с.

60. Савич И.Н. Порядок и варианты технологии подземной разработки руд с закладкой выработанного пространства / И.Н. Савич // Горная промышленность. – М. – 1999. – № 2. – С. 5 – 9.

61. Ресурсосберегающая технология выемки руды на контакте с закладочным массивом / А.Е. Воробьев, Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник и др. // Маркшейдерия и недропользование. – М., 2010. – № 5. – С. 22 – 29.

62. Борисов И.Н. Энерго- и ресурсосбережение при обжиге цементного клинкера на основе комплексной интенсификации технологических процессов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.17.11 / Борисов Иван Николаевич; Белгород. гос. технол. ун-т. – Белгород, 2008. – 42 с.

63. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.

64. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ: учебн. для вузов / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М: МИСИС, 1994. – 328 с.

65. Иванова В.П. Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова, Б. К. Касатов, Т. Н. Карасавина. – Л.: Недра, 1974. – 400 с.

66. Логвиненко Н. В. Методы определения осадочных пород: учеб. пособие для вузов / Н.В. Логвиненко, Э.И. Сергеева. – Л.: Недра, 1986. – 240 с.

67. Накамото К. ИК спектры соединений / К. Накамото; пер. с англ. Л. В. Христенко; под ред. Ю. А. Пентина. – М.: Мир. 1991. – 536 с.

68. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2 кн. пер. с англ. / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. – М.: Мир, 1984. – Кн. 2. – 303 с.

69. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

70. О механическом измельчении компонентов твердеющей закладки для заполнения выработанного пространства рудников / М.В. Петлеваний, А.М. Кузьменко, Л.Ж. Горобец и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 3. – С. 75 – 78.

71. Упрочнение строительных материалов при обработке в струях / Л.Ж. Горобец, В.В. Коваленко, Н.С. Прядко и др. // *Динаміка та міцність машин, будівель, споруд: сб. науч. тр.* – Полтава, 2009. – Вып. 3 (25), т. 3. – С. 59 – 66.

72. Весовое дозирование зернистых материалов / С.В. Першина, А.В. Каталымов, В.Г. Однолько и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.

73. Методические рекомендации по контролю качества закладочных смесей. – Апатиты, 1990. – 89 с.

74. Типовая технологическая инструкция производства закладочных работ на горнорудных предприятиях Украины / *Науч.-исслед. горн.-руд. ин-т. –Кривой Рог*, 2010. – 62 с.

75. Регламент технологических производственных процессов при ведении закладочных работ на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»: ГМК Норильский никель, РТПП – 045 – 2004. – 54 с.

76. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

77. Рамачандран В.С. Добавки в бетон: справ. пособ. / В.С. Рамачандран. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.

78. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: технология и свойства: учеб. для вузов / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.

79. Тогобицкая Д.Н. Оценка кристаллизационной способности и минералогического состава конечных доменных шлаков в сырьевых и технологических условиях доменных печей заводов Украины / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр.* – Д.: ИЧМ НАН Украины, 2009. – Вып. 20. – С. 54 – 60.

80. Оптимизация составов закладочных смесей. Анализ химико-минералогического состава и физико-технических показателей шлаков Донецко-Приднепровского региона / В.А. Кулик, А.А. Салей, Т.В. Кравченко и др. // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2004. – № 2. – С. 54 – 60.

81. Формирование параметров закладочного массива / У.А. Алдамбергенов, Г.А. Прокушев, Т.А. Осипова и др. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 192 с.

82. Невилль А. Свойства бетона / А. Невилль; сокр. пер. с англ. В.Ф. Парфенова и Т.Ю. Якуб. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.

83. Бутт Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов: учебник / Ю.М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев; [ред. В. В. Тимашев]. – М.: Высш. шк., 1980. – 472 с.
84. Кингери У. Д. Введение в керамику / У.Д. Кингери. – М. : Стройиздат, 1987. – 500 с.
85. Рояк С.М. Специальные цементы: учеб. пособ. для вузов / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1983. – 279 с.
86. Хайнике Г. Трибохимия: пер. с англ. / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
87. Эйтель В. Физическая химия силикатов: пер. с англ. / В. Эйтель. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 1054 с.
88. Дворкин Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учеб.-справ. пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 368 с.
89. Тейлор Х. Химия цемента. TIF / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
90. Кузнецова Т.В. Физическая химия вяжущих материалов: учеб. для вузов / Т.В. Кузнецова, И. В. Кудряшов, В. В. Тимашев. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
91. Казанская Е.Н. Образование гидратных фаз портландцементного камня: текст лекций / Е.Н. Казанская. – Л., 1990. – 50 с.
92. Брыков А.С. Гидратация портландцемента: учеб. пособие / А.С. Брыков. – С.-Пб., 2008. – 30 с.
93. Домокеев А.Г. Строительные материалы / А.Г. Домокеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 494 с.
94. Семириков И.С. Физическая химия строительных материалов: учеб. пособие / И.С. Семириков. – Екатеринбург: ГОУ УГТУ–УПИ, 2002. – 245 с.
95. Латыпов В.П. Интенсификация и концентрация очистной выемки при камерной системе с твердеющей закладкой: дис. ...канд. техн. наук: 05.15.02 / Латыпов Виталий Мухаметович; Днепропетр. гор. ин-т. – Д., 1989. – 153 с.
96. Коренюгина Н.В. Повышение экономичности цементных композиций, введение минеральных наполнителей / Цемент-2008: материалы интернет-конференции RUCEM.RU: (Итоги лета) Режим доступа: <http://www.tpribor.ru/cemkomp.html>.
97. Дедешко Ю.И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю.И. Дедешко, М.Б. Креймер, Г.С. Крыхтин. – М.: Стройиздат, 1966. – 271 с.
98. Липилин А.Б. Портландцемент – ударная активация / А.Б. Липилин, М.В. Векслер, Н.В. Коренюгина // Популярное бетоноведение. – 2007, октябрь. – С. 75 – 81.
99. Соколов А. А. Исследование влияния удельной поверхности и гранулометрического состава шлака на свойства шлакощелочных вяжущих / А. А. Соколов, Н.Р. Хабибуллина, Р.З. Рахимов // Строительное материаловедение: сб. докл. междунар. науч.-практ. интернет-конф. – Белгород, 2005. – С. 216 – 219.

100. Убонов А.В. Эффективные бетоны с использованием смешанных вяжущих на основе вулканических шлаков Забайкалья: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.05 / Убонов Алексей Валерьевич; Вост.-Сиб. гос. техн. ун-т. – Улан-Удэ, 2007. – 23 с.

101. Хайрутдинов М.М. Формирование разнопрочных закладочных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых / М.М. Хайрутдинов, Г.А. Карасёв // Горн. информ.-анал. бюлл. – 2008, № 3. – С. 276 – 283.

102. Нариков К.А. Технология и свойства стеновой керамики на основе лессовидных суглинков с применением механоактивированных композиционных добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.05 / Нариков Канат Амангелдиевич; Науч.-исслед. и проект. ин-т. строит. мат. ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ». – Алматы, 2010. – 24 с.

103. Хайрутдинов М.М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования / М.М. Хайрутдинов, И.К. Шаймярдянов // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2009. – № 1. – С. 240 – 250.

104. Говоров А.А. Гидратация доменных гранулированных шлаков в перегретой водной среде / А.А. Говоров, Д.Ф. Новохатский // Строительные материалы. – 1968. – С. 22 – 23.

105. Хайрутдинов М.М. Формирование разнопрочных закладочных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых / М.М. Хайрутдинов, Г.А. Карасёв // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2008. – № 3. – С. 276 – 283.

106. Chistyakov E. Investigation of the geomechanical processes while mining thick ore deposits by room systems with backfill of worked-out area / E. Chistyakov, V. Ruskh, S. Zubko // Geomechanical processes during underground mining, CRC Press/Balkema Taylor&Francis Group, London, UK, 2012. – p. 127 – 132.

107. Борисенко С.Г. Вскрытие и системы разработки рудных месторождений / С.Г. Борисенко. – К.: Вища. шк., 1977. – 296 с.

108. Волощенко В.П. Геомеханические основы разработки мощных железорудных месторождений системами с закладкой: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.15.02 / Волощенко Владимир Петрович; Днепропетр. горн. ин-т. – Д., 1985. – 314 с.

109. Шаровые и галечные мельницы [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.metso.com/ru/miningandconstruction.pdf>

110. Шаровые мельницы METSO. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://maxi-exkavator.ru/excapedia/technic/type/sharovie_melnici/metso.

111. Мельницы с перемешиванием мелющей среды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://metso.com/miningandconstruction.pdf>

112. Ртищев А.Б. Перспективы использования оборудования для процессов измельчения / А.Б. Ртищев, М.Н. Борисова, Ю.Н. Варченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – Д., 2006. – Вип. 25 (66) – 26(67). – С. 40 – 44.

113. Седельникова Г.В. Эффективные технологии извлечения золота из руд и концентратов / Г.В. Седельникова, А.И. Романчук // Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 45 – 50.

114. Грэхем Дэйви. SMD-мельницы компании MetsoMinerals [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mining-media.ru/ru/article/drobilka/1037-smd-melnitsy-kompanii-metso-minerals>.

115. Грэхем Дэйви. Тонкое измельчение в технологии извлечения золота с применением вертикальных мельниц METSO с перемешиванием мелющей среды. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.zolotonews.ru/news/24054.htm>.

116. IsaMill. Разрушая границы [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://isamill.com/EN/Downloads/Documents/IsaMillBrochureRU.pdf>

117. Isamill fine grinding technology and its industrial applications at mount Isa mines [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.isamill.com/EN/Downloads.pdf>.

118. 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. // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2013. – № 10. – С. 97 – 101.

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. РАЗРАБОТКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ	4
1.1 Горно-геологические условия разработки рудных месторождений камерными системами с твердеющей закладкой	4
1.2. Анализ применения твердеющей закладки на рудниках	6
1.3. Составы твердеющей закладки	8
1.4. Анализ влияния структурных связей твердеющей закладки на ее прочностные характеристики	16
1.5. Применение твердеющей закладки при разработке Южно-Белозерского месторождения	20
1.6. Причины разрушения закладочных массивов очистных камер первой и второй очередей	27
2. ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА НА СТРУКТУРУ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ	29
2.1. Исследование структуры и параметров твердеющей закладки	29
2.2. Структурные образования в твердеющей закладке при различной дисперсности вяжущего материала	38
2.3. Влияние тонкодисперсных частиц вяжущих веществ на прочность искусственного камня	44
3. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ НА ОСНОВЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ	48
3.1. Исследование дисперсного состава подготовленных вяжущих материалов	48
3.2. Результаты исследования минерального состава закладочных материалов	52
3.3. Результаты лабораторных исследований параметров закладочных смесей	60
3.4. Формирование структуры твердеющей закладки при разной удельной поверхности	70
3.5. Исследование распределения прочности и слоистости в закладочном массиве камер большого объема	82
4. ТЕХНОЛОГИЯ ВЕДЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ ОЧИСТНЫХ КАМЕР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ	94
4.1. Повышение устойчивости закладочных массивов очистных камер	94
4.2. Рекомендации по технологии заполнения очистных камер твердеющей закладкой с применением тонкодисперсных вяжущих материалов	97

4.3. Технологическая схема получения тонкодисперсного вяжущего материала.....	109
4.4. Экономическая оценка предлагаемой технологии заполнения очистных камер твердеющей закладкой с применением тонкодисперсных вяжущих материалов	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	127
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	129

Наукове видання

Кузьменко Олександр Михайлович

Петльований Михайло Володимирович

Усатий Володимир Юрійович

**ТВЕРДЮЧЕ ЗАКЛАДЕННЯ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ
РУДНИХ КРУТИХ ПОКЛАДІВ У СКЛАДНИХ
ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

Монографія

(Російською мовою)

Редактор Ю.В. Рачковська

Підп. до друку 28.04.2015. Формат 70x100/16.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,8.
Обл.-вид. арк. 7,8. Тираж 20 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842
від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.