

На правах рукописи

ОЗЕРОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ БРИКЕТИРОВАНИЯ
СУЛЬФИДНОГО МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И
СИЛИКАТНОГО ФЛЮСА**

*Специальность 05.16.02 – Металлургия черных,
цветных и редких металлов*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ООО «Институт Гипроникель».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Цемехман Лев Шлёмович

Официальные оппоненты:

Коневский Михаил Романович

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
кафедра металлургические и литейные технологии, профессор

Кусков Вадим Борисович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра обогащения полезных ископаемых,
доцент

Ведущая организация:

ОАО «Научно-исследовательский институт цветных металлов
«ГИНЦВЕТМЕТ»

Защита состоится 31 марта 2017г в 14 час 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.224.03 при
Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106,
Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Санкт-Петербургского горного университета и на сайте
<http://www.spmi.ru>.

Автореферат разослан 31 января 2017г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БРИЧКИН
Вячеслав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На текущий момент основной сырьевой базы металлургической промышленности являются мелкозернистые руды и концентраты, которые представляют собой продукты глубокого обогащения, оборотные материалы, техногенные отходы, ранее не вовлекавшиеся в переработку. Необходимость использования данных материалов объясняется количественным содержанием в них ценных компонентов.

Вовлечение в переработку мелкозернистых материалов часто осложняется их агрегатным состоянием. Во-первых, переработка их в некоторых металлургических агрегатах, таких как руднотермические, шахтные печи, горизонтальные конвертора Пирса-Смита сопряжена с возникновением аварийных ситуаций (хлопки, взрывы, выбросы расплава) и высокой степенью незавершенности производства. Во-вторых, возникает проблема транспортировки дисперсных материалов от мест их добычи или складирования непосредственно до металлургического агрегата. Поэтому успешным способом вовлечения в переработку мелкозернистых материалов является их предварительное окускование, а именно, брикетирование.

В подавляющем большинстве случаев в брикетируемый материал производится добавка, индивидуально подобранного «внешнего» связующего в количестве, обеспечивающем необходимые прочностные характеристики. Универсального связующего одинаково эффективного для всех мелкозернистых материалов не существует. Сегодня в качестве связующих применяется весьма широкий спектр минеральных (неорганических) и органических материалов. В некоторых случаях, например, при брикетировании окисленной никелевой руды нет необходимости в добавке «внешних» связующих веществ.

Одновременно с тем, что вид и расход связующего является решающим условием прочности, получаемых брикетов, затраты, связанные с его закупкой и транспортировкой, нередко составляют не менее 50% от себестоимости брикетов, поэтому выбор рационального связующего вещества является ключевым фактором, определяющим эффективность процесса брикетирования мелкозернистых материалов.

Цель работы

Разработка технологии брикетирования силикатного флюса (просора песчаника Кайерканского угольного разреза) Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель» для переработки в различных металлургических агрегатах, а также выбор рационального связующего для снижения затрат при брикетировании медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК».

Научная новизна

1. На основании анализа научно-технической литературы и результатов собственных исследований установлены закономерности изменения качественных характеристик брикетов от вида и расхода связующего, давления прессования, влажности шихты, гранулометрического состава, обосновывающие рациональные параметры процесса брикетирования.

2. С помощью оптических методов изучена структура брикетов с различными видами связующих: водный раствор сульфата никеля, жидкое стекло, технический лигносульфонат. Установлено, что наиболее равномерное распределение связующего по телу брикета наблюдается при использовании технического лигносульфоната.

3. Установлено, что наибольшей эффективностью обладают комбинированные связующие, полученные из компонентов, обладающих соизмеримыми вяжущими свойствами. В данном случае наблюдается «эффект суперпозиции».

4. На основании характера разрушения брикетов установлено, что при использовании неорганических связующих брикеты представляют собой хрупкое тело, в значительной степени подверженное истирающим и ударным разрушениям. В свою очередь брикеты, полученные при использовании органических связующих, характеризуются большей пластичностью, что позволяет им дольше сохранять потребительские свойства.

Практическая значимость

1. Разработана технология брикетирования просора песчаника Кайерканского угольного разреза Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель», включающая в себя сушку просора в сушильном барабане, смешение его с лигносульфонатом и брикетирование шихты на валковом прессе с последующей упрочняющей сушкой брикетов в том же сушильном барабане.

Технология позволяет получить прочные с требуемой влажностью брикеты, которые можно использовать на различных переделах металлургического производства. На основании технологического регламента, разработанного по результатам настоящей работы Департаментом проектных работ ООО «Институт Гипроникель», выполнены технико-экономические расчеты, показавшие высокую эффективность данной технологии.

2. Изучено влияние различных связующих на брикетированность медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» (водные растворы сульфатов, комбинированные связующие на основе лигносульфоната, модифицированные лигносульфонаты, поливиниловый спирт, синтетические органические связующие). В качестве альтернативных лигносульфонату связующих предложены: поливиниловый спирт марки PVA 088-50, комбинированное связующее Лигносульфонат-Comprex A12, связующее Термопласт 4СВ и рекомендованы рациональные параметры их использования. Результаты лабораторных исследований подтверждены проведенными промышленными испытаниями.

Методы исследований. Для исследований вещественного состава исходных материалов использовались методы химического анализа (атомно-абсорбционная спектрометрия и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой), растровый электронный микроскоп Tescan 5130MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов, рентгенофазовый анализ. Гранулометрический состав материалов определялся методами ситового и лазерно-дифракционного анализов. Исследования брикетирования материалов проводились на валковом брикет-прессе В050 производства фирмы «K.R. Komarek, Inc.». Контроль влажности осуществлялся на влагомере MA-45 «Sartorius». Прочность брикетов определялась на модифицированном гидравлическом прессе. Для изучения структуры брикетов использовался микроскоп универсальный RX фирмы «Leica». Коэффициент динамической вязкости измерялся на ротационном вискозиметре DV-II+ фирмы «Brookfield Inc.», плотность связующих определялась ареометрами общего назначения АОН-1 ПАО «Стеклоприбор».

Основные защищаемые положения

1. Качественные характеристики брикетов зависят от множества факторов, среди которых: давление прессования, влажность шихты, гранулометрический состав, выбор и расход связующего; ключевым является выбор связующего.

2. Получение брикетов из просора песчаника, обладающих высокими прочностными характеристиками, достигается путем выбора рациональных параметров процесса и связующего - технического лигносульфоната, применение которого наряду с низким расходом характеризуется наиболее равномерным распределением по телу брикета.

3. В условиях минимальной реконструкции существующей технологии брикетирования медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» и при сохранении прочностных характеристик брикетов на должном уровне в качестве связующих альтернативных лигносульфонату могут быть использованы поливиниловый спирт марки PVA 088-50, комбинированное связующее Лигносульфонат-Comprex A12, связующее Термопласт 4СВ.

Достоверность результатов подтверждается полным соответствием современных представлений физико-химической сущности брикетирования, использованием промышленных материалов (медно-никелевый концентрат, просор песчаника, связующие), применением современных методов исследований и оборудования: валковый брикет-пресс В050 фирмы «K.R. Komarek Inc.» производительностью до 25кг/час, растровый электронный микроскоп Tescan 5130MM с системой микроанализа SPIRIT (ED-спектрометр) и YAG-кристаллом в качестве детектора отраженных электронов, микроскоп универсальный RX фирмы «Leica».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на заседаниях научно-технических советов ООО «Институт Гипроникель», АО «Кольская ГМК», ПАО «ГМК «Норильский Никель».

Личный вклад автора состоит в анализе существующих и перспективных процессов брикетирования мелкозернистых руд и концентратов с различными видами связующих; проведении

экспериментальных исследований, обработке и обобщении их результатов; подготовке публикаций.

Автор выражает сердечную благодарность за творческую помощь, содействие и поддержку во время выполнения диссертационной работы Портову А.Б. (ст.н.с. ООО «Институт Гипроникель»).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержит 223 страницы машинописного текста, 116 рисунков, 27 таблиц, список литературы из 171 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, ее научная и практическая ценность, сформулированы цели и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** выполнен критический анализ способов брикетирования мелкозернистых руд и концентратов, представлена классификация связующих веществ, рассмотрены преимущества и недостатки различных связующих.

В **главе 2** рассмотрены теоретические аспекты брикетирования мелкозернистых материалов, обоснован выбор рациональных параметров процесса.

Глава 3 включает разработку технологии брикетирования заскладированного просора песчаника Кайерканского угольного разреза Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель», обеспечивающей получение брикетов, обладающих высокими потребительскими свойствами.

В **главе 4** приведены результаты лабораторных исследований брикетируемости флотационного медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» с различными видами связующих альтернативных используемому в настоящий момент техническому лигносульфонату.

Заключение отражает общие выводы и рекомендации по результатам исследований в соответствии с поставленными целями и решенными задачами.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Качественные характеристики брикетов зависят от множества факторов, среди которых: давление прессования, влажность шихты, гранулометрический состав, выбор и расход связующего; ключевым является выбор связующего.

Между давлением прессования и прочностью брикетов существует линейная зависимость – с ростом давления возрастает и прочность. Увеличение давления прессования при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» с 35 до 50 кН приводит к более чем двукратному увеличению прочности брикетов на сжатие – с 69 до 149 кгс/брикет (рисунок 1).

В конечном итоге, при брикетировании давление прессования (P) затрачивается на: преодоление трения частиц друг о друга (P_1); преодоления трения частиц о поверхность валков (P_2); на деформацию частиц (P_3); деформацию рабочей поверхности (P_4).

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Мелкозернистые материалы характеризуются высокой полидисперсностью и широким многообразием форм частиц. Известно, что при брикетировании с увеличением дисперсности порошка, увеличивается площадь контакта между зернами, а, следовательно, и прочность получаемых брикетов.

При исследовании влияния гранулометрического состава просора песчаника месторождения КУР УНГП на прочность брикетов установлено, что зависимость носит нелинейный характер (рисунок 2). Максимальную прочность имеют брикеты, полученные из шихты, состоящей на 15-20% из рядового просора песчаника, имеющего эквивалентный диаметр частиц 4,433мм, и 80-85% измельченного просора с эквивалентным диаметром 0,289мм. Это объясняется тем, что частицы крупной фракции создают своеобразный каркас, пустоты которого заполняют мелкие пылевидные фракции. Такая упаковка частиц характеризуется большой площадью контакта зерен, что способствует более

равномерному распределению по телу брикета внешних разрушающих воздействий.

Особенно сильно прочность брикетов зависит от содержания влаги и формы ее связи с материалом. Вероятнее всего, значение рациональной влажности шихты, обеспечивающей максимальную прочность брикетов, соответствует значению максимальной молекулярной влагоемкости брикета (ММВ). При прочих равных условиях брикеты, полученные из различных мелкозернистых материалов, имеют различную плотность и пористость, обуславливаемые химико-минералогическим составом и физико-химическими свойствами. Пористость, в свою очередь, определяет величину ММВ, а, следовательно, и значение рациональной влажности шихты. Из этого следует, что изменение давления прессования и дисперсности шихты, оказывает влияние на значение рациональной влажности брикетируемой шихты.

Основная роль при брикетировании мелкофракционных материалов принадлежит связующим веществам. В независимости от природы связующего значительное влияние имеет его агрегатное состояние (см. рисунок 3). Порошковые связующие, как правило, обладают невысокой реакционной активностью, что позволяет получать качественные брикеты только после длительной выдержки шихты, во время которой происходит развитие взаимодействия между связующим и частицами материала. Кроме того, введение связующего в виде порошка создает многокомпонентную смесь, должное усреднение которой подчас не представляется возможным. Это приводит к тому, что получаемые брикеты обладают весьма разрозненными прочностными характеристиками, что отрицательно сказывается на следующем этапе производства.

Связующие вещества в виде растворов более равномерно распределяются в объеме брикетируемого материала. Они образуют на поверхности частиц тонкий слой клеевой пленки, увеличивающий истинную площадь контакта частиц и способствующий развитию максимальных значений сил адгезии.

Важным фактором повышения прочностных характеристик брикетов является температура прессования. Так при повышении температуры шихты медно-никелевого концентрата АО «Кольская

ГМК», поступающей на брикетирование, с 25 до 85°С происходит увеличение прочности брикетов в 1,5-2 раза.

Под температурой прессования следует понимать не только температуру брикетируемой шихты, но и температуру вводимого связующего. Нагрев связующего позволяет существенно снизить его вязкость, в результате чего достигается тонкослойное растекание связующего по поверхности зерен. Это позволяет свести к минимуму количество зерен непокрытых связующим.

В целом увеличение температуры прессования позволяет снизить величину давления и расход связующего, необходимые для получения качественных брикетов.

Естественно, в промышленных условиях стремятся обеспечить максимально допустимые усилия и температуру прессования. Гранулометрический состав мелкозернистого материала полностью определяется стадией, предшествующей брикетированию. Несмотря на положительный эффект упрочняющих операций, их внедрение неизбежно повлечет за собой как высокие капитальные затраты так и рост текущих, что в известной степени сказывается на себестоимости продукции. Из двух оставшихся рассматриваемых параметров (влажность и вид связующего) в большей степени влияние на эффективность процесса брикетирования, несомненно, оказывает правильный выбор связующего вещества.

2. Получение брикетов из просора песчаника, обладающих высокими прочностными характеристиками, достигается путем выбора рациональных параметров процесса и связующего - технического лигносульфоната, применение которого наряду с низким расходом характеризуется наиболее равномерным распределением по телу брикета.

В качестве объекта исследования использовалась проба просора песчаника месторождения КУР УНГП, следующего состава: 1,12 Fe_Σ; 1,44 FeO; 0,52 CaO; 0,41 MgO; 10,2 Al₂O₃; 72,3 SiO₂; 0,60 Na₂O; 2,58 K₂O; 0,25 S_Σ; 0,07 Sso₄; 7,2 C.

По данным анализа, проведенного методами РЭМ и РСМА, основа пробы просора песчаника месторождения КУР УНГП представлена α-кварцем. (рисунок 4).

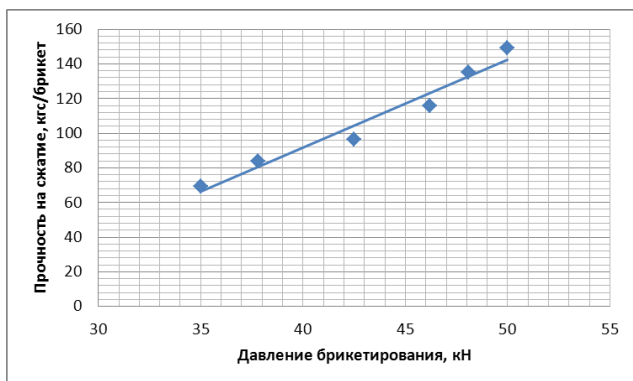


Рисунок 1 – Влияние давления прессования на прочность брикетов медно-никелевого концентрата, полученных с использованием в качестве связующего 10% комбинированного связующего ЛСТ-Comprex A12

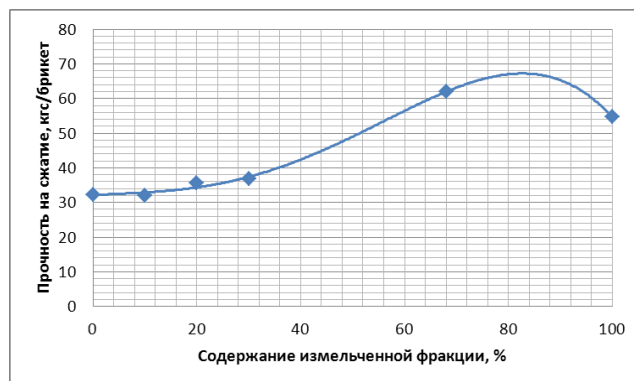


Рисунок 2 – Зависимость прочности брикетов просора песчаника КУР, полученных при использовании 10% извести в качестве связующего, от содержания измельченной фракции

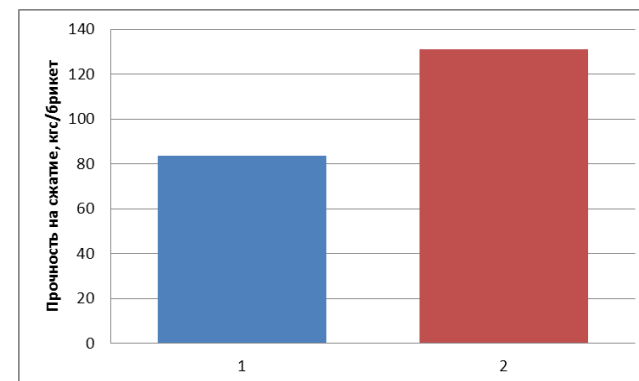
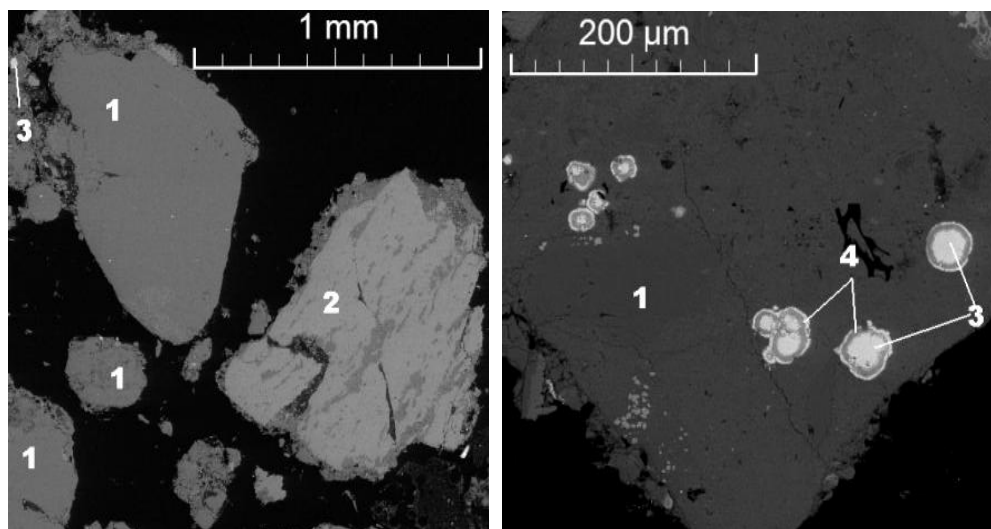


Рисунок 3 – Влияние агрегатного состояния связующего (ЛСТ), при одинаковых расходах на сухой вес, на прочность брикетов медно-никелевого концентрата: 1 – порошок, 2 – жидкий раствор



1 – кварц; 2 – полевошпатные минералы; 3 – пирит; 4 – продукты окисления пирита

Рисунок 4 - Общий вид и строение пробы просора песчаника месторождения КУР УНГП

Таблица 1 – Основные технические характеристики валкового пресса В050 производства фирмы «K.R. Komarek, Inc.»

№ п/п	Техническая характеристика	Размерность	Величина
1	Диаметр валков	мм	100
2	Ширина валков	мм	38
3	Скорость вращения валков	об/мин	0 - 7,5
4	Максимальный крутящий момент валков	Н·м	380
5	Максимальное давление прессования	кН	50
6	Размер брикетов	мм	34x18x12
7	Скорость вращения шнека питателя	об/мин	0 – 137
8	Максимальный крутящий момент шнека	Н·м	42
9	Производительность пресса	кг/час	1 - 25

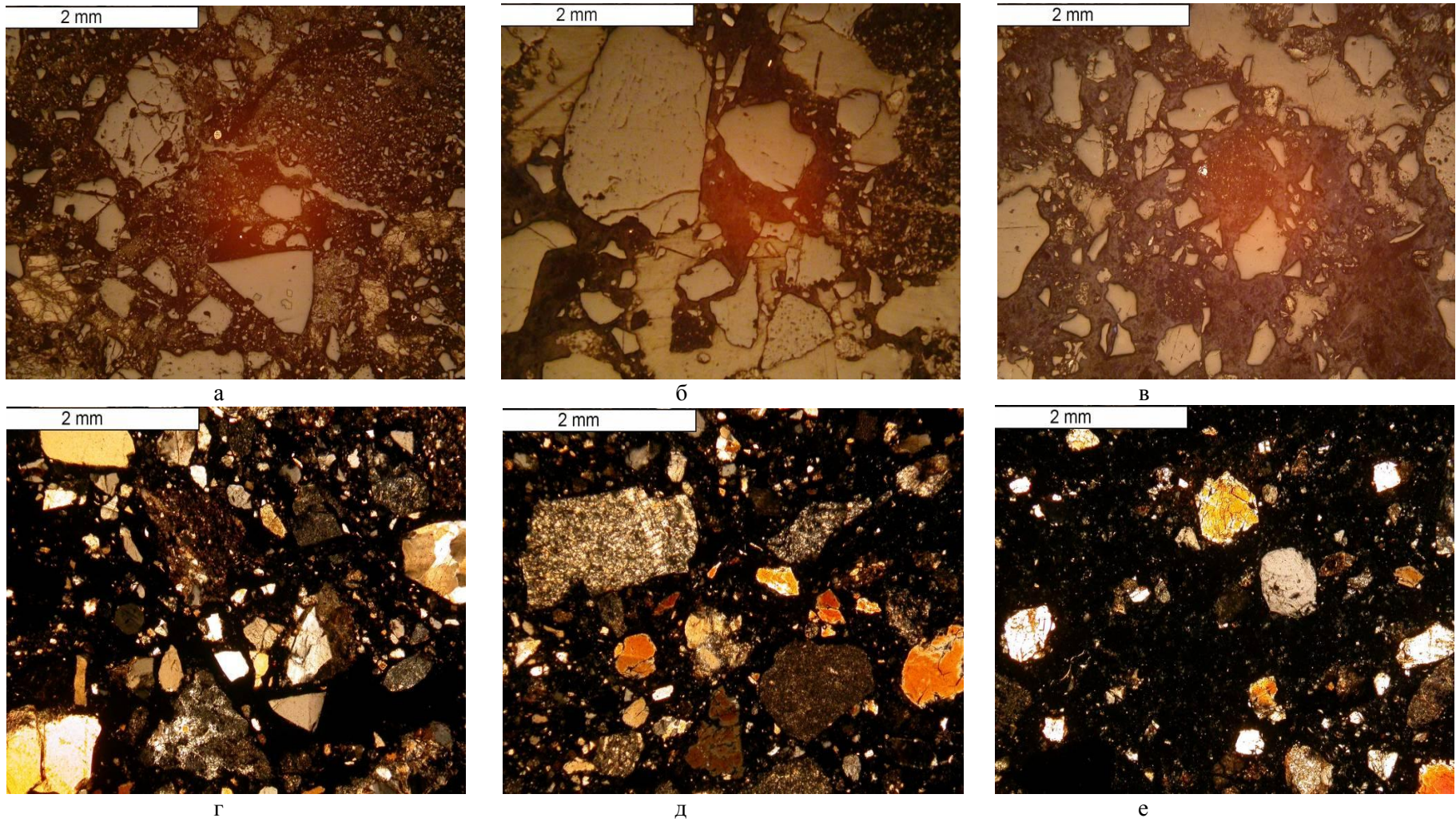


Рисунок 5 – Прозрачные (а, б, в) и полированные (г, д, е) шлифы брикетов просора песчаника с использованием различных связующих при 30 кратном увеличении. а, г – лигносульфонат, б, д – жидкое стекло, в, е – сульфат натрия

Исследования брикетированности проводились на валковом прессе В050 производства фирмы «K.R. Komarek, Inc.» (США), основные технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Установлено, что брикетирование просора песчаника месторождения КУР УНГП на валковом прессе в отсутствие связующего неэффективно вследствие низкой прочности получаемых брикетов. В связи с этим при брикетировании просора песчаника месторождения КУР УНГП необходимо использование связующих веществ.

В качестве связующих веществ использовались: ангидрит, гашеная известь, портландцемент, алебастр, каолин, водные растворы сульфатов меди и никеля, жидкое натриевое стекло, технический лигносульфонат (ЛСТ) и хлорид кальция в качестве активатора твердения.

Брикетирование просора песчаника с использованием связующих, применяемых в строительной индустрии (гашеной извести, портландцемента, алебаstra и каолина), а также ангидрита не приводит к достижению брикетами нормативной прочности (≥ 140 кгс/брикет). Не помогает ни введение в состав связующего активатора твердения (хлорида кальция), ни изменение гранулометрического состава просора песчаника в сторону снижения его крупности.

В целом основной причиной получения брикетов неудовлетворительной прочности при брикетировании просора песчаника с помощью данных связующих является недостаточная влажность шихты, что обусловлено безаварийной работой валкового пресса без зависания брикетируемого материала в его бункере и залипания рабочих ячеек. Другой причиной является необходимость длительной выдержки шихты перед брикетированием.

Получение качественных брикетов возможно при использовании водных растворов сульфатов никеля, жидкого стекла, технического лигносульфоната. Однако необходимым условием является проведение упрочнительной сушки.

Прочность в 140 кгс/брикет достигают брикеты, полученные при использовании в качестве связующего жидкого натриевого

стекла. Влажность шихты при этом должна составлять 4,3-5,0%, а содержание связующего в шихте быть не менее 5%. Выход возврата в таких условиях весьма существенен и достигает ~35%.

Использование при брикетировании просора песчаника растворов сульфатов никеля и меди, позволяет при упрочнительной сушке брикетов, полученных в области рациональной влажности шихты (4,0-4,5%) при содержании сульфата никеля в шихте 0,5% (в пересчете на сухой вес) достигать необходимой прочности в 140 кгс/брикет. При использовании в качестве связующего растворов сульфата меди брикеты из просора песчаника имеют меньшую прочность на сжатие, чем брикеты при использовании сульфата никеля. Выход возврата при брикетировании просора песчаника с растворами сульфатов не превышает 18-20% и линейно снижается при повышении влажности шихты и увеличении содержания связующего в брикетируемой шихте.

При брикетировании просора песчаника с использованием технического лигносульфоната его содержание в шихте для достижения брикетами после упрочнительной сушки необходимой прочности (≥ 140 кгс/брикет) должно составлять 2,5%. При таком расходе ЛСТ и рабочей влажности шихты ~3,5% выход возврата составляет 19-21%, существенно снижаясь при росте расхода связующего.

При изучении распределения связующего в брикетах оптическими методами в отраженном свете на микроскопе универсальном RX фирмы «Leica» установлено, что наиболее равномерное распределение связующего происходит при использовании лигносульфоната (рисунок 5). В случае применения сульфата никеля отмечаются наиболее плохие результаты. Связующее не «связывает» частицы, а распределено в виде отдельных скоплений с наличием пустот между отдельными частицами. Использование в качестве связующего жидкого стекла позволяет получить промежуточные результаты по структуре брикетов, изготовленных из шихты просора песчаника с ЛСТ и сульфатом никеля.

Таким образом, наиболее эффективным связующим при брикетировании просора песчаника является лигносульфонат.

Лигносульфат является отходом целлюлозно-бумажной промышленности, прост в подготовке к использованию в процессах брикетирования, и цена его сравнительно невелика. При его использовании в количестве 2,5-3,0% и последующей упрочнительной сушке можно получать брикеты нормативной прочности. Низкое количество мелочи при брикетировании позволяет надеяться на незначительное количество возврата, повторно отправляемое на брикет-пресс, что не приведет к его перегрузке. По результатам проведенных исследований была разработана технологическая схема производства брикетов из просора песчаника месторождения КУР УНГП, представленная на рисунке 6.

3. В условиях минимальной реконструкции существующей технологии брикетирования медно-никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» и при сохранении прочностных характеристик брикетов на должном уровне в качестве связующих альтернативных лигносульфонату могут быть использованы поливиниловый спирт марки PVA 088-50, комбинированное связующее Лигносульфат-Comprex A12, связующее Термопласт 4СВ.

В качестве объекта исследования использовался коллективный медно-никелевый концентрат АО «Кольская ГМК» в виде отжатого кека после фильтрации, следующего состава, %: 8,03-8,42 Ni; 3,26-4,08 Cu; 27,40-30,20 Fe; 19,60-20,40 S₂; <0,10 Sso₄; 18,00-19,70 SiO₂; 0,60-0,70 CaO; 0,90-1,08 Al₂O₃; 10,9-12,4 MgO.

По данным рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, проведенного методами РЭМ и РСМА, основу фазового состава проб концентрата составляют: пентландит, халькопирит, пирротин, тальк и серпентин. Кроме того, присутствуют первые проценты пирита, магнетита, а также, с большой вероятностью, следы минералов группы хлорита и амфибола (рисунок 7). Сульфатные соединения металлов в пробах не обнаружены.

Исследования проводились на валковом прессе В050 производства фирмы «K.R. Komarek, Inc.» (США), основные технические характеристики которого представлены в таблице 1.

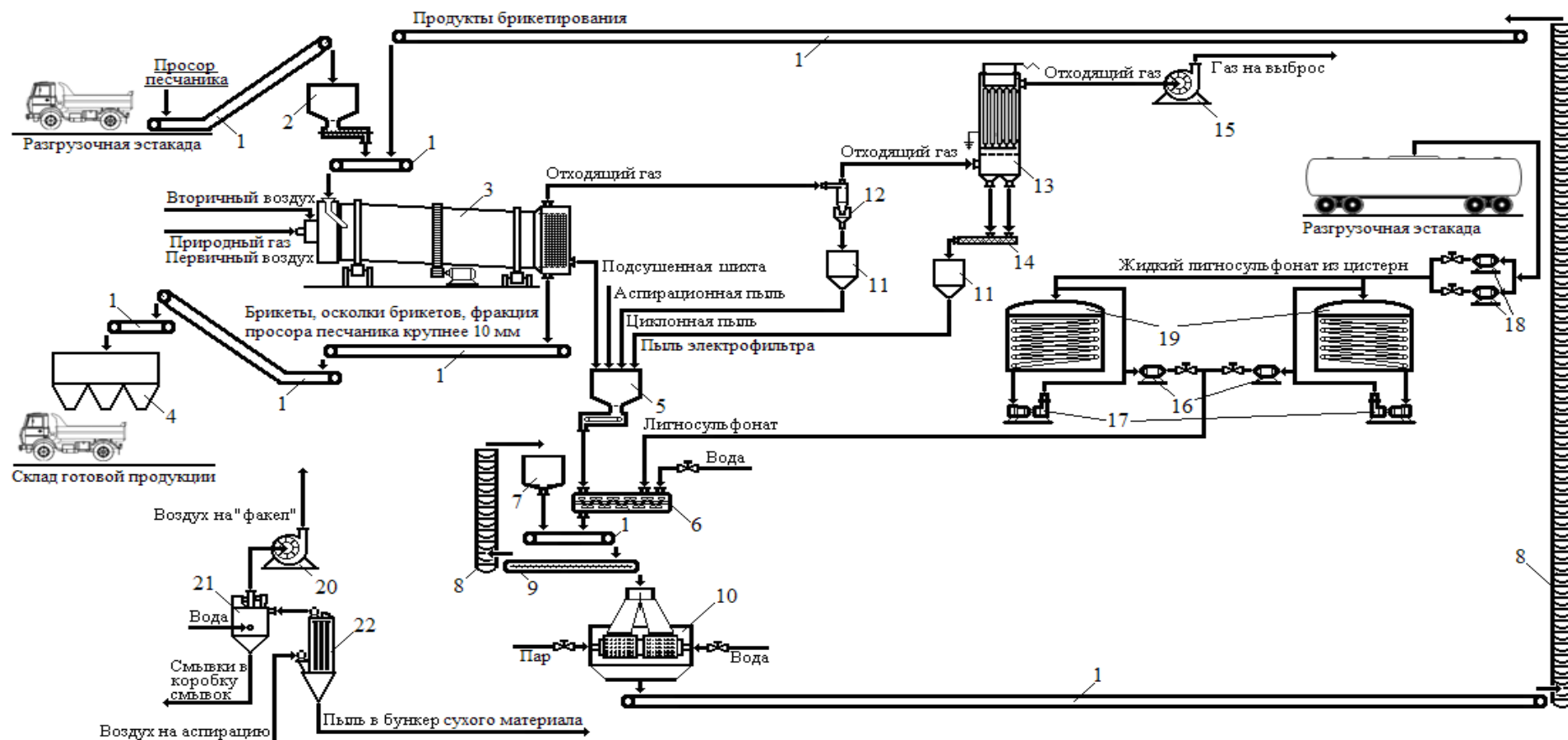
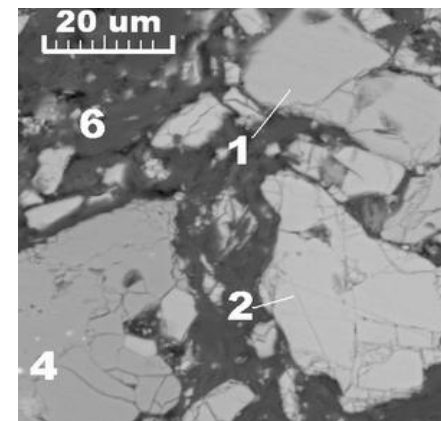
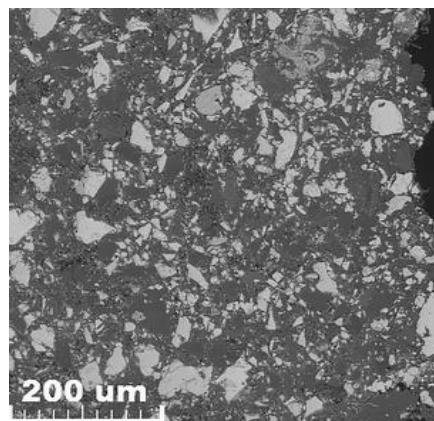
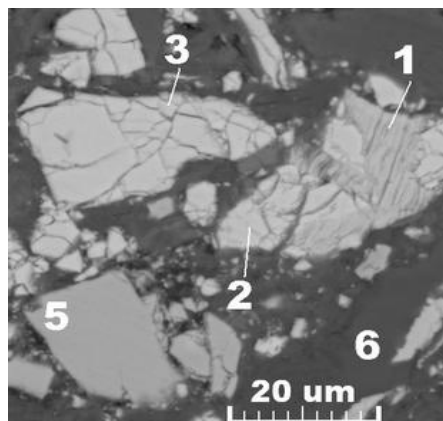


Рисунок 6 – Технологическая схема производства брикетов из просора песчаника месторождения КУР УНГП.

- 1 – ленточные транспортеры, 2 – приемный бункер просора песчаника со шнековым дозатором, 3 – сушильный барабан с газовой горелкой и бутарой, 4 – бункер готовой продукции, 5 – бункер сухого материала, 6 – шнековый смеситель, 7 – бункер готовой шихты, 8 – ковшовые элеваторы, 9 – скребковый транспортер (редлер), 10 – валковый брикет-пресс, 11 – пылевые бункера, 12 – циклон, 13 – электрофильтр, 14 – шнековый транспортер, 15 – дымосос, 16 - насос-дозатор для подачи лигносульфоната, 17 – центробежный насос кольцевой линии подачи лигносульфоната, 18 – насосы для откачки связующего из цистерн, 19 - приемные баки жидкого лигносульфоната, 20 – вентилятор, 21 - рукавный фильтр, 22 – «мокрый» пылеуловитель



1 – пирротин; 2 – пентландит; 3 – халькопирит; 4 – магнетит; 5 – пирит; 6 – силикатная часть

Рисунок 7 – Общий вид и строение медно-никелевого концентрата



а



б

Рисунок 8 – Вид брикетов после приложения внешней нагрузки. Расход и тип связующего: а – 10% водного раствора сульфата никеля; б – 10% водного раствора поливинилового спирта

Все используемые в исследованиях связующие можно подразделить на три группы: водные растворы сульфатов, комбинированные связующие на основе лигносульфоната и органические. Полный перечень используемых в исследовании связующих включает в себя: лигносульфонат технический; сернокислые алюминий, натрий, никель, медь, закисное железо, окисное железо; раствор вскрытия железистого кека; серная кислота; гашеная известь; связующие «Термопласт СВ» и «Kemiga Oyj»; модифицированные лигносульфонаты; связующее COMPREX A12; поливиниловый спирт (ПВС); стоки карбонатного передела ЦЭН-1.

Брикетирование с использованием водных растворов сульфатов имеет ряд общих характерных черт:

- отсутствие огрубления шихты, при смешении концентрата и связующего;
- высокие значения интервала рациональной влажности шихты;
- характер разрушения брикетов при испытании прочности на сжатие.

Перечисленные черты, безусловно, имеют негативный характер. Отсутствие огрубления шихты на первой стадии добавки связующего приведет к увеличению пылевыноса на последующем этапе сушки и росту количества пыли, поступающего на вторую стадию добавки связующего. В свою очередь повышение количества тонкодисперсной пыли в составе брикетируемой шихты приводит к снижению прочности брикетов и увеличению расхода связующего.

Высокие значения интервала рабочей влажности в совокупности с отсутствием огрубления шихты создают благоприятные условия для зависания шихты в бункере брикет-пресса и залипания его ячеек, что может стать причиной внеплановых остановок одной из линий или же всего участка брикетирования.

Брикеты, полученные при использовании сульфатных связующих, под действием внешней нагрузки раскалываются на множество мелких осколков (рисунок 8а). Это свидетельствует, о том, что при высокой прочности на сжатие брикеты представляют собой хрупкое тело и под воздействием вибраций при движении по

ленте транспортера на склад готовой продукции, перегрузках и дальнейшей транспортировке будут ломаться и истираться, снижая качество материала, поступающего в плавильный цех.

Нормативная прочность брикетов 140 кгс/брикет и более достигается при брикетировании с использованием раствора серной кислоты, водных растворов сульфата никеля, закисного и окисного железа, а также раствора вскрытия железистого кека. Исходя из условий минимальной реконструкции существующей технологии брикетирования на АО «Кольская ГМК» и эксплуатационных характеристик оборудования, не позволяющих использовать материалы, имеющие значение водородного показателя pH менее 3,5 ед., использование в качестве связующего серной кислоты, сульфата окисного железа и раствора вскрытия железистого кека невозможно, ввиду высокой коррозионной активности. Несмотря на то, что водный раствор сульфата никеля имеет допустимое значение pH (~5 ед.), высокие значения, как рабочей влажности брикетирования, так и остаточной влажности брикетов, в обоих случаях превышающие 3%, не обеспечивают условия для безопасной переработки таких брикетов в рудно-термических печах.

Эффективность применения комбинированных связующих при брикетировании полностью определяется вяжущими свойствами составных компонентов и условиями, в которых они получают максимальное развитие. Если составляющие комбинированного связующего имеют сильное различие в вяжущих свойствах, то использование такого связующего непродуктивно. Его эффективность всецело зависит от массовой доли компонента, обладающего более высокой вяжущей силой. Наиболее эффективно использовать в качестве компонентов комбинированного связующего вещества, имеющие приблизительно равные вяжущие свойства. В этом случае наблюдается «эффект суперпозиции». «Эффект суперпозиции» заключается в том, что при определенных пропорциях компонентов комбинированного связующего брикеты имеют более высокую прочность, чем при использовании составляющих компонентов по отдельности. Условия, в первую очередь значения рабочей влажности брикетирования, при которых такое комбинированное связующие будет проявлять наибольшую

эффективность, зависят от массовой доли составляющих компонентов и условий брикетирования, характерных для каждого компонента в отдельности. Чем выше массовая доля компонента, для которого характерны более высокие значения рациональной влажности брикетирования, нежели для другого составляющего, тем выше рациональная влажность брикетирования при использовании комбинированного связующего, и наоборот. При этом интервал рациональной влажности брикетирования присущий комбинированному связующему не может иметь значения более высокие или более низкие, чем величины свойственные для составляющих компонентов.

Наиболее эффективно использование при брикетировании коллективного медно-никелевого концентрата комбинированного связующего ЛСТ-Сомпрех А12. При массовом соотношении компонентов 3÷7 качественные брикеты удается получать при 10% расходе связующего. В этом случае снижение расхода связующего в пересчете на сухой вес составляет ~65%. Подача связующего может осуществляться как в виде предварительно приготовленной смеси, так и компонентами, последовательно друг за другом. Снижение расхода связующего, значения рН=4,8-6,0 ед., низкая остаточная влажность брикетов, не превышающая критическую величину (3%), создают предпосылки для успешного применения данного связующего при брикетировании на АО «Кольская ГМК».

Несомненно, что эффективность органических связующих определяется их составом, пространственным строением и наличием тех или иных функциональных групп. Брикеты, получаемые при использовании органических связующих, в отличие от применения минеральных связующих, под действием внешней нагрузки, не разрушаются, а только «расползаются», что свидетельствует о том, что они являются пластичными телами (рисунок 8б). За счет пластичности брикеты в меньшей степени подвергаются ударным и истирающим воздействиям, что позволяет им сохранять качественные характеристики при большом количестве перегрузок и длительных транспортировках.

Использование при брикетировании медно-никелевого концентрата связующих производства компании «Kemira Oyj»

(Финляндия) не позволяет получать брикеты приемлемой прочности.

Из связующей серии Термопласт СВ минимальный расход связующего, обеспечивающий получение качественных брикетов, наблюдается при использовании образца 4 СВ. Так, при 8% содержании образца 2СВ прочность брикетов на сжатие составляет ~140 кгс/брикет, а при 4СВ – ~155кгс/брикет. В данном случае снижение расхода связующего относительно использования лигносульфоната в пересчете на сухой вес составляет ~30%.

При брикетировании с использованием модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ, производства компании ООО ПК «ХИМПЭЖ» рациональные дозировки при использовании в качестве связующего технического лигносульфоната жидкой консистенции и модифицированных лигносульфонатов серии ЛСМ в пересчете на сухой вес практически совпадают друг с другом. В целом значимых преимуществ перед техническим лигносульфонатом жидкой консистенции не выявлено.

Наивысшей эффективностью из всех исследованных образцов органических связующих обладает поливиниловый спирт. В пересчете на сухой вес его количество необходимое для получения качественных брикетов составляет 1,5%. Снижение расхода связующего в этом случае составляет 75%. Используемый в качестве связующего 10% раствор поливинилового спирта имеет значения рН и остаточной влажности брикетов, удовлетворяющие установленным на производстве нормам безаварийного протекания процессов.

На основании лабораторных исследований по поиску альтернативных техническому лигносульфонату связующих для проведения промышленных испытаний рекомендованы следующие связующие: 10% водный раствор поливинилового спирта марки РВА 088-50; комбинированное связующее ЛСТ-Сomplex А12; связующее Термопласт 4СВ.

При участии автора на участке брикетирования АО «Кольская ГМК» были проведены промышленные испытания в рабочих условиях, которые полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и рекомендации:

1. На основании критического анализа научно-технической литературы и результатов лабораторных исследований установлено, что качественные характеристики брикетов зависят от множества факторов, ключевым из которых является выбор связующего.

2.1. Исследовано влияние широкого спектра связующих веществ на брикетируемость просора песчаника месторождения КУР УНГП. Установлено, что получение качественных брикетов возможно при использовании водного раствора сульфата никеля, жидкого стекла и технического лигносульфоната. При этом необходимым условием является проведение упрочнительной сушки.

2.2. При изучении микроструктуры брикетов из просора песчаника Кайерканского угольного разреза оптическими методами в отраженном свете, установлено, что наиболее равномерное распределение связующего по телу брикета наблюдается при использовании технического лигносульфоната.

2.3. На основании результатов лабораторных исследований разработана технология брикетирования просора песчаника Кайерканского угольного разреза, включающая в себя сушку просора в сушильном барабане, смешение его с лигносульфонатом и брикетирование шихты на валковом прессе с последующей упрочняющей сушкой брикетов. Технология позволяет получить прочные с требуемой влажностью брикеты, которые можно использовать на различных переделах металлургического производства. Выполненные технико-экономические расчеты показали высокую эффективность данной технологии.

3.1. Проведено экспериментальное сравнение влияния различных связующих на брикетируемость медно-никелевого концентрата АО «Кольская ГМК» (водные растворы сульфатов, комбинированные связующие на основе лигносульфоната, модифицированные лигносульфонаты, поливиниловый спирт, синтетические органические связующие). Установлено, что:

- использование в качестве связующего водных растворов сульфатов характеризуется отсутствием огрубления шихты, при

смешении концентрата и связующего, а также высокими значениями интервала рациональной влажности шихты, что негативно сказывается на процессе брикетирования;

- наибольшей эффективностью обладают комбинированные, связующие, полученные из компонентов, обладающих соизмеримыми вяжущими свойствами. В данном случае наблюдается «эффект суперпозиции»;

- характер разрушения брикетов, полученных при использовании неорганических связующих, свидетельствует о том, что они представляют собой хрупкие тела, которые под воздействием вибраций при движении по ленте транспортера, перегрузках и дальнейшей транспортировке будут разрушаться, снижая качество готовой продукции. Напротив, органические связующие, за счет своего пространственного строения, обеспечивают получение более пластичных брикетов, менее подверженных ударным и истирающим воздействиям.

3.2. В качестве альтернативных лигносульфонату связующих предложены:

- 10% водный раствор поливинилового спирта марки PVA 088-50. Рекомендуемый общий расход связующего – 15%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 14%, на второй – 1%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,5-1,5%;

- комбинированное связующее ЛСТ-Comprex A12. Массовая доля сухих веществ в техническом лигносульфонате – 50%, водном растворе связующего Comprex A12 – 10%. Массовое соотношение компонентов 3÷7. Рекомендуемый расход связующего – 10%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 8%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности брикетирования 0,8-1,8%;

- связующее Термопласт 4СВ производства ООО «Полипласт Новомосковск». Массовая доля сухих веществ – 55%. Рекомендуемый расход связующего – 8%. Дозировка связующего на первой стадии смешивания – 6%, на второй – 2%. Интервал рабочей влажности 0,9-1,9%.

При участии автора на участке брикетирования АО «Кольская ГМК» были проведены промышленные испытания в рабочих

условиях, которые полностью подтвердили результаты лабораторных исследований.

Основные результаты диссертации представлены в следующих печатных работах:

1. **Озеров С.С.** Исследование брикетируемости заскладированного просора песчаника Кайерканского угольного разреза. Сообщение 1. / **Озеров С.С.**, Портов А.Б., Блехштейн Б.Л., Цемехман Л.Ш., Фомичев В.Б. // Цветные металлы. – 2013. – №.3 – с.27-30.

2. **Озеров С.С.** Исследование брикетируемости заскладированного просора песчаника Кайерканского угольного разреза. Сообщение 2. / **Озеров С.С.**, Портов А.Б., Блехштейн Б.Л., Цемехман Л.Ш., Фомичев В.Б. // Цветные металлы. – 2013. – №.4 – с.42-46.

3. **Озеров С.С.** Брикетирование мелкозернистых материалов / **Озеров С.С.**, Портов А. Б., Цемехман Л. Ш. // Цветные металлы. – 2014. – №. 7 – с.26-31.

4. **Озеров С.С.** Выбор оптимального связующего для брикетирования сульфидных медно-никелевых концентратов / **Озеров С.С.**, Портов А.Б., Цемехман Л.Ш., Машьянов А.К. / Деп. в ВИНТИ РАН 31.03.2015 № 68-В2015. – 2015. – 58 с.

5. **Озеров С.С.** Брикетирование мелкозернистых материалов в металлургической промышленности // Сборник научных работ III Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (г. Москва, март 2015). – Москва: ЕНО, 2015. – с. 24-27.