

На правах рукописи



Нурмаганбетова Бакыт Назарбековна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРАЦИИ
МЕЛОЧИ ХРОМОВЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ФЛЮСОВ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Металлургия железа и сплавов» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
ЖДАНОВ Александр Витальевич

Официальные оппоненты: **ФРОЛОВ Юрий Андреевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО Научно-производственное предприятие «Уралэлектра» (г. Екатеринбург), консультант-металлург отдела систем регулирования и метрологии;

СИВЦОВ Андрей Владиславович,
доктор технических наук, ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург), ведущий научный сотрудник лаборатории электротермии восстановительных процессов

Ведущая организация: ОАО «Уральский институт металлов»,
г. Екатеринбург

Защита состоится «10» ноября 2017 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=271595>

Автореферат разослан «___» сентября 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проблема утилизации мелочи хромовой руды и вовлечения ее в производство ферросплавов актуальна на протяжении уже более чем полувека. Накопление хромовой руды в виде мелкой фракции (-10 мм) в количестве 20 – 50% от общего объема добычи в отвалы приводит к дефициту и росту стоимости кусковой руды на ферросплавных заводах Республики Казахстан и Российской Федерации. При этом содержание ведущего элемента в некондиционных по причине фракционного состава рудах, например, Кемпирсайского месторождения, составляет 49,0 – 50,5% Cr_2O_3 , что существенно (на 10 – 15% Cr_2O_3) превышает содержание хрома в кусковых рудах, вовлекаемых в производство ферросплавов.

Вовлечение мелких фракций богатой хромовой руды в производство ферросплавов возможно в случае успешного решения проблемы их окускования. Организация процесса агломерации мелочи хромовой руды связана с проблемой ее тугоплавкости, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей работы агломашин как из-за низкой стойкости оборудования, так и нестабильности качества получаемого агломерата, в связи с чем конкурентоспособность агломерации как метода существенно снижается.

В 2010 году на Аксуском заводе ферросплавов (АксЗФ, Павлодарская область, Республика Казахстан) был запущен цех по производству хромового агломерата, который в 2015 году выпустил миллионную его тонну. Ранее в 2003 году там же была запущена экспериментальная агломерационная установка в лаборатории научно-исследовательского центра АксЗФ, на которой с участием автора были проведены несколько серий опытно-промышленных спеканий аглошихт. В настоящее время производительность действующего производства агломерационного цеха АксЗФ составляет около 60 – 70% от проектных значений (60 т/ч).

Увеличение объемов производства агломерата из мелочи хромовой руды будет способствовать, во-первых, сокращению ее складирования в отвалах, а во-вторых, замене дорогостоящей кусковой хромовой руды агломератом при производстве высокоуглеродистого феррохрома, за счет чего и достигается основной экономический эффект всей технологической цепочки.

Снижение температур спекания мелочи хромовой руды может быть достигнуто за счет применения флюсующих добавок, главным образом, на основе кремнезема. Имеющиеся в литературе разрозненные сведения о применении различных флюсующих материалов природного и техногенного происхождения редко включают сравнение различных добавок, а также не систематизированы. Так, из литературных данных известно, что типовым флюсом, применяемым при спекании мелочи хромовой руды, является кремнезем в виде отсевов кварцита либо песка; встречаются отдельные работы по испытаниям того или иного флюса; иногда проводится сравнение его добавки с каким-либо еще одним материалом. Исследования, направленные на определение влияния различного вида и количества флюсующих добавок, при прочих равных условиях, на температуры спекания хромовой руды с последующей оценкой показателей качества и технико-экономической эффективности процесса агломерации, а также применения продукта при производстве ферросплавов, в литературе отсутствуют. Отрывочны и сведения о процессах, протекающих при нагреве и спекании хромовых руд в присутствии флюсов, а также формировании структуры спека. В связи с изложенным, работа, направленная на решение проблемы окускования мелочи хромовой руды, повышение

технико-экономических показателей спекания и поиск новых, более дешевых и эффективных флюсующих материалов, является, несомненно, актуальной.

Степень разработанности темы исследования

В прошедшие годы агломерацией мелочи хромовых руд занимались в ограниченных масштабах, и вместе с тем предпринимался ряд попыток спекания хромовых руд без флюсующих добавок на типовых конвейерных агломерационных машинах, предназначенных для окускования железорудных материалов, которые дали отрицательные результаты. В дальнейшем были проведены работы, направленные на снижение температуры плавления хромитовой руды до уровня, приемлемого для работы стандартного оборудования агломашины. Для этих целей было рекомендовано добавлять в шихту к хромовой руде различные флюсы: кварцит, песок, микросилику, а также шунгит, бентонит, боратовые руды и ряд других. Вопросами агломерации хромовых руд занимались Д.Г. Хохлов, В.В. Кашин, Ю.И. Сухарников, А.А. Акбердин, А.С. Ким, И.Б. Едильбаев и ряд других исследователей.

Цель работы: изучение процесса и разработка технологии агломерации хромовой мелочи с применением новых флюсующих добавок с целью повышения производительности агломашины и качества агломерата с последующим испытанием полученного продукта при выплавке высокоуглеродистого феррохрома.

Задачи исследования:

1. Экспериментально изучить влияние количества и вида традиционных и новых флюсов на температуры спекания хромовой руды и осуществить выбор флюсующих добавок рационального состава и количества;
2. Определить влияние вида и количества флюсов на скорость спекания, выход годного и прочностные характеристики агломерата;
3. Изучить механизм влияния флюсующих добавок на процесс спекания мелочи хромовой руды и характеристики готового агломерата;
4. Повысить производительность процесса агломерации без ухудшения качества готового продукта;
5. Оценить возможность применения хромового агломерата, полученного с добавкой в качестве флюсов алюмосиликатных глин, при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в рудовосстановительной электропечи.

Научная новизна:

1. Получены новые экспериментальные данные по температурам начала и температурному интервалу размягчения мелочи хромовой руды, силикатных и алюмосиликатных флюсов и их смесей, позволившие провести сравнение влияния различных по природе флюсов и определить их рациональное количество для снижения температуры спекания мелочи хромовой руды. Применение глин уже в количестве 5% мас. позволяет снизить температуру конца размягчения хроморудного сырья с 1820 до 1497 – 1605°C, что сравнимо с добавлением 10% мас. мелочи (-2 мм) традиционной флюсующей добавки – кварцита (1477°C).
2. Методами рентгеноструктурного микроанализа (РСМА), рентгенофазового (РФА) и дифференциально-термического анализа (ДТА) получены новые данные о процессе спекания мелочи хромовой руды с различными флюсами, структуре и фазовому составу исходных материалов и спека, а также последовательности превращений при нагреве в интервале температур от 50 до 1500°C, в результате чего установлено, что добавление глин в состав аглошихты обеспечивает меньший по величине эндотермический эффект в интервале 900–1300 °C по сравнению с «классическими» силикатными флюсами;

3. Определены оптимальные параметры процесса спекания мелочи хромовой руды и прочностные характеристики полученного агломерата с различными флюсами; установлено их рациональное количество и состав, обеспечивающие наиболее высокую производительность и прочностные характеристики агломерата. Аглошихты рекомендованного состава содержат карасорскую глину в количестве 5 %, обеспечивая выход годного >82 %, прочность агломерата ~67 % и производительность 1,08 т·м²/ч, либо карасорскую глину в количестве 5 % в смеси с 2 % микросилики, что обеспечивает выход годного 78–84 %, прочность агломерата 57–64 % и производительность 0,93–0,96 т·м²/ч.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. В результате анализа диаграмм состояния системы MgO – SiO₂ – Al₂O₃, с позиций технологии производства высокоуглеродистого феррохрома, реализуемой в электропечах переменного тока, где рациональным шлаковым режимом считается отношение 40:40:20, а при избытке MgO в составе руды целесообразно добавлять в шихту SiO₂ либо Al₂O₃ в составе флюсов рационального состава было предложено применение алюмосиликатных глин при агломерации мелочи хромовых руд.

2. Установлено влияние различных силикатных и алюмосиликатных флюсов на спекание мелочи хромовой руды на основе данных высокотемпературных лабораторных экспериментов по определению температур начала, конца и температурного интервала размягчения и результатов опытных спеканий, в результате чего установлено, что добавка 10 % алюмосиликатной карасорской глины снижает температуру конца размягчения на 220–230 °С, а ее использование в качестве флюса, в том числе, в смеси с микросиликой, способствует повышению производительности агломашины на 19 %;

3. По результатам серии опытных спеканий установлено преимущество применения алюмосиликатных глин, а также их смесей с техногенным отходом ферросплавного производства (микросиликой) в качестве флюсов взамен используемых в настоящее время при агломерации мелочи хромовой руды мелочи кварцита, строительного и оборотного песка, что способствует повышению скорости спекания, выходу годного и повышению прочности агломерата;

4. Установлена принципиальная возможность производства высокоуглеродистого феррохрома из 100% хромового агломерата и проведено сравнение работы печи на опытном и базовом вариантах окускованного материала. Оценены перспективы использования предлагаемого агломерата в сравнении с производимым в настоящее время на предприятии, показаны преимущества предлагаемой технологии.

Методология и методы диссертационного исследования: Применены современные методы химического (атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой фирмы «SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS» модель «SPECTRO FLAME MODULAS»), рентгеноспектрального (сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Carl Zeiss EVO 40); электронный микроскоп Jeol JSM-7001F и рентгенофазового (дифрактометр D8 ADVANCE Bruker AXS) анализа и др. Расшифровка рентгенографических данных – по базам данных PDF-2 и PDF-4. Дифференциально-термический анализ проведен на дериватографе TGA/DSC с ИК спектрометром TGA/DSC 1 (Mettler Toledo, Model 2, Star System). Высокотемпературные эксперименты выполнены на установках, основные элементы которых – нагревательные электропечи сопротивления. Опытные спекания мелочи хромовой руды проводили на полупромышленной установке экспериментального участка

АксЗФ. Выплавка высокоуглеродистого феррохрома из опытных агломератов проведена в условиях экспериментального цеха научно-исследовательского инновационного центра компании Eurasian Resources Group (НИИЦ ERG) при АксЗФ в печи мощностью 1,2 МВ·А. Физико-химические характеристики всех материалов изучены по методикам, соответствующим ГОСТ.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального изучения влияния количества и вида силикатных и алюмосиликатных флюсов и их смесей на температуры спекания хромовой руды.

2. Результаты изучения влияния вида и количества флюсов на скорость спекания, выход годного и прочностные характеристики агломерата.

3. Результаты изучения механизма влияния флюсующих добавок на процесс спекания мелочи хромовой руды и характеристики готового агломерата, полученные методами рентгеноструктурного микроанализа (РСМА), рентгенофазового (РФА) и дифференциально-термического анализа (ДТА).

4. Результаты полупромышленных экспериментов по производству высокоуглеродистого феррохрома при работе на 100% хромового агломерата, полученного с применением новых флюсов.

Степень достоверности и апробация результатов базируется на проведении исследований на современных сертифицированных приборах по стандартным методикам, соответствующим ГОСТ, и подтверждении теоретических и экспериментальных данных полупромышленными испытаниями.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных научно-практических конференции «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках Сатпаевских чтений, (г. Экибастуз, 2006, 2012 и 2013 гг, Алматы 2007 г.); II – IV Международных интерактивных научно-практических конференциях «Инновации в материаловедении и металлургии», (г. Екатеринбург, 2012, 2013 и 2015 гг.); XV Международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали», (Челябинск, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса» (г. Екатеринбург, 2013); Международной научно-практической конференции «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья», (Караганда, 2015 г.).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-03-31167 с привлечением оборудования центра коллективного пользования «Урал-М» и Международной стипендии «Болашак» Правительства Республики Казахстан. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии подтверждены актом испытаний АО «Аксуский завод ферросплавов».

Личный вклад автора

Изложенные в работе результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автором выполнены: обзор и анализ данных по проблеме агломерации мелочи хромовой руды; отбор и подготовка материалов для лабораторных исследований и экспериментов; высокотемпературные исследования по определению температур начала и температурного интервала размягчения; опытно-промышленные исследования по разработке технологии спекания мелочи хромовых руд с использованием алюмосиликатных и силикатных флюсов и выплавке из полученного агломерата высокоуглеродистого феррохрома.

Автор принимал участие в постановке цели и задач, направленных на ее достижение, обсуждении результатов исследований и их обобщении, а также выработке технологических рекомендаций.

Публикации. По результатам работы опубликовано 22 научные работы, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ, из которых 3 статьи проиндексированы в базе данных Scopus; 1 патент на изобретение Республики Казахстан; 14 статей в сборниках трудов Всероссийских и Международных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 142 страницах машинописного текста, включающего введение, пять глав, заключение, содержит 34 рисунка, 34 таблицы, список литературы из 75 наименований и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор направления исследований, освещена сущность проблемы по теме диссертации, определена область основных задач исследований, показана актуальность темы.

Глава 1. Аналитический обзор по вопросу окускования мелочи хромовой руды

В первой главе проведен аналитический обзор по проблеме окускования мелочи хромовых руд, состояния и перспектив рудной базы и объемов производства ферросплавов в мире, Республике Казахстан и Российской Федерации. Рассмотрены основные существующие способы и проблемы окускования мелких фракций хромовой руды, их достоинства и недостатки.

Проанализированы особенности технологии агломерации хромовой руды и проведен аналитический обзор применения различных флюсов. Показано, что в научно-технической литературе отсутствуют данные о принципах подбора рационального количества и состава флюса, а также механизму его воздействия на температуры процесса и структуру аглоспека.

Незначительна доля исследований, в которых устанавливается взаимосвязь между количеством и составом флюса, улучшением технико-экономических показателей аглопроцесса и некоторыми параметрами технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома.

В результате выполненного анализа литературных данных по рассматриваемой в работе проблеме сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2. Изучение влияния вида и количества флюса на температуры начала, конца и температурный интервал размягчения хромовой руды

Во второй главе рассмотрены теоретические основы процесса размягчения минерального сырья и представлены результаты экспериментов по изучению температур размягчения хромовой руды, флюсов и их смесей. Определение температур начала, конца и температурного интервала размягчения проводилось в соответствии с ГОСТ 26517-85.

Химический состав образцов алюмосиликатных флюсов и хромовой руды приведен в таблицах 1 и 2.

Результаты изучения температур начала ($t_{нр}$), конца ($t_{кр}$) и температурного интервала (Δt) размягчения чистых материалов и их смесей представлены в таблицах 3 и 4, соответственно.

Характер усадки образцов руды с добавкой флюсов представлен на рисунке 1.

Таблица 1 – Химический состав флюсов

| № | Материал | Химический состав, масс. % | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|------------------|-------------------|--------|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | FeO | S | P | K ₂ O | Na ₂ O | п.п.п. |
| 1 | Глина экибастузская 2 – 3 мм | 58,24 | 15,88 | 2,95 | 1,30 | 7,10 | <0,03 | <0,03 | 1,57 | 1,7 | 2,0 |
| 2 | Глина бускульская 2 – 3 мм | 51,8 | 29,6 | 3,07 | 0,30 | 11,63 | <0,03 | <0,03 | 1,52 | 2,7 | 0,5 |
| 3 | Глина карасорская 2 – 3 мм | 59,9 | 18,3 | 0,93 | 0,83 | 15,42 | <0,03 | <0,03 | 1,69 | 2,61 | 3,72 |
| 4 | Микросилика 0,1 – 0,5 мкм | 95,5 | 0,53 | 1,04 | 0,42 | 0,74 | 0,15 | 0,03 | 0,35 | 0,5 | н.д. |
| 5 | Кварцит –2 мм | 97,6 | 1,2 | н.д. | 0,1 | 0,27 | <0,03 | 0,014 | н.д. | н.д. | н.д. |
| 6 | Кварцит 2 – 3 мм | 97,6 | 1,2 | н.д. | 0,1 | 0,27 | <0,03 | 0,014 | н.д. | н.д. | н.д. |

Таблица 2 – Химический состав хромовой руды

| № | Материал | Химический состав, масс. % | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|--|
| | | Cr ₂ O ₃ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | FeO | S | P | |
| 1 | Хромовая руда Донского ГОКа (3–5 мм) | 47,7 | 9,7 | 5,0 | 22,2 | 0,5 | 11,5 | 0,022 | 0,010 | |
| 2 | То же, (–3мм) | 48,2 | 8,58 | 7,08 | 20,6 | 1,04 | 11,9 | 0,023 | 0,015 | |

Таблица 3 – Температуры начала ($t_{\text{нр}}$), конца ($t_{\text{кр}}$) и температурный интервал (Δt) размягчения чистых флюсов и хромового сырья

| № | Наименование материала | $t_{\text{нр}}$ | $t_{\text{кр}}$ | Δt |
|---|--------------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
| 1 | Глина экибастузская 2 – 3 мм | 759 | 1128 | 369 |
| 2 | Глина бускульская 2 – 3 мм | 927 | 1545 | 618 |
| 3 | Глина карасорская 2 – 3 мм | 944 | 1214 | 270 |
| 4 | Микросилика 0,1 – 0,5 мкм | 915 | 1467 | 552 |
| 5 | Кварцит –2 мм | 1620 | 1700 | 80 |
| 6 | Кварцит 2 – 3 мм | 1660 | 1710 | 50 |
| 7 | Хромовая руда Донского ГОКа 3 – 5 мм | 1410 | 1820 | 410 |
| 8 | Хромовая руда Донского ГОКа –3мм | 1221 | 1664 | 443 |

Как следует из данных, представленных в таблице 4 и на рисунке 1, применение уже 5% глин (№6, 8 и 10, таблица 4) позволяет добиться снижения температуры начала размягчения на 19 – 55°C по сравнению с вариантом добавления 10% кварцита фракции 2 – 3 мм (№3, таблица 4).

В случае дополнительного измельчения кварцита до фракции –2 мм и его добавки в аналогичном количестве 10% мас. (№2, таблица 4), снижение температуры начала размягчения хромовой руды становится сопоставимым с вариантом добавления 10% глин (№7, 9 и 11, таблица 4).

Таблица 4 – Температуры начала ($t_{н.р.}$), конца ($t_{к.р.}$) и температурный интервал размягчения (Δt) хромитовой руды с добавкой флюса

| № | Материал | Количество добавки | $t_{н.р.}$ | $t_{к.р.}$ | Δt |
|----|---|--------------------|------------|------------|------------|
| 1 | Кварцит (мелочь –2 мм) | 5 | 1145 | 1550 | 405 |
| 2 | Кварцит (мелочь –2 мм) | 10 | 1066 | 1477 | 411 |
| 3 | Кварцит (крупность 2 – 3 мм) | 10 | 1159 | 1550 | 391 |
| 4 | Микросилика (0,1 – 0,5 мкм) | 5 | 1107 | 1511 | 404 |
| 5 | Микросилика (0,1 – 0,5 мкм) | 10 | 1110 | 1509 | 399 |
| 6 | Экибастузская глина(крупность 2 – 3 мм) | 5 | 1128 | 1497 | 369 |
| 7 | Экибастузская глина(крупность 2 – 3 мм) | 10 | 1103 | 1449 | 346 |
| 8 | Бускульская глина (крупность 2 – 3 мм) | 5 | 1104 | 1569 | 465 |
| 9 | Бускульская глина (крупность 2 – 3 мм) | 10 | 1090 | 1488 | 398 |
| 10 | Карасорская глина (крупность 2 – 3 мм) | 5 | 1140 | 1605 | 465 |
| 11 | Карасорская глина (крупность 2 – 3 мм) | 10 | 1040 | 1453 | 413 |

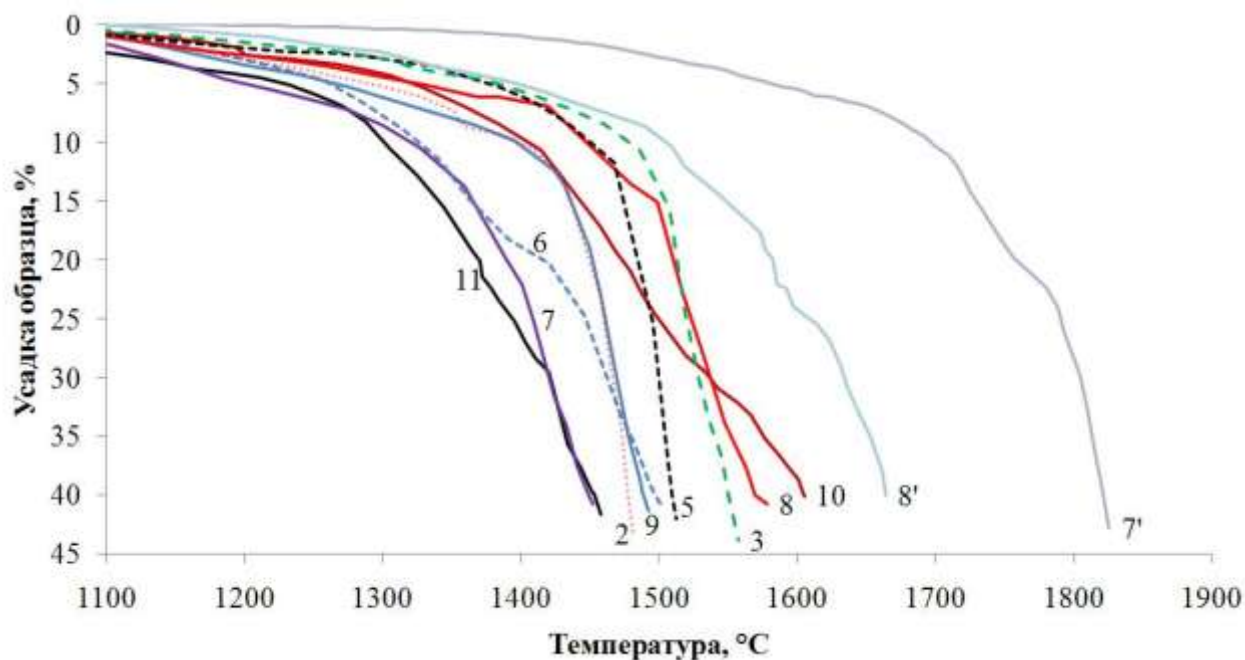


Рисунок 1 – Зависимость усадки образцов хромитовой руды ДГОКа

Цифры со штрихом (7' и 8') у кривых соответствуют номерам материалов в таблице 3, а остальные (материалы 2, 3, 5 – 11) – смесям хромовой руды с изученными флюсами в таблице 4.

В промышленности такое технологическое решение сопряжено с существенным ростом затрат на дополнительное измельчение кварцита. В целом, влияние добавок 5% мас. экибастузской и карасорской глин (№6 и 9, таблица 4) на $t_{к.р.}$ различается (1497 – 1605°C), в то время как при их добавлениях в количестве 10% мас. (№7 и 11, таблица 4) температуры конца размягчения (1449 и 1458 °C) близки.

Уже при добавлении 5% мас. экибастузской глины (№6) снижение $t_{к.р.}$ сопоставимо с действием добавки 10% мас. измельченного кварцита (№2; 1477°C). По всей вероятности, это свидетельствуют о большем влиянии фракции руды

в данном интервале по сравнению с количеством флюса. Добавление предлагаемых флюсов (глин, микросилики и их смесей) позволяет снизить температуры начала размягчения на 10 – 40 °С, температуры конца размягчения на 50 – 100°С по сравнению с "традиционными" флюсами.

В результате серии экспериментов были сформулированы технологические рекомендации по рациональному составу и количеству флюсов на основе данных о их влиянии на температуры размягчения мелочи хромовой руды.

Глава 3. Проведение опытных спеканий шихт с рациональным количеством и составом флюсующих добавок

В третьей главе рассмотрены теоретические основы агломерации хромовой руды и представлены результаты опытных спеканий шихт с рациональным количеством и составом флюса.

Перед использованием флюсы (таблица 1) подвергались сушке (70 – 100 °С), измельчению и рассеvu на классы –1 мм и –3 мм. Используемый в аглошихте возврат имел крупность 0 – 8 мм. Для постели применялся агломерат фракции 8 – 10 мм. Составы аглошихт для опытных спеканий по результатам приведены в таблице 5.

Компоненты шихты в сухом виде взвешивали, смешивали в барабане, увлажняли до заданного значения (8%) и окомковывали в течение 3 мин. Опытные спекания проводили на агломерационной установке с чашей диаметром 260 мм, высотой 500 мм. При спекании высота слоя постели и аглошихты во всех случаях составляла соответственно 50 и 450 мм. Разрежение во всех экспериментах было постоянным и находилось в пределах 9,0 – 9,5 кПа.

На первом этапе были проведены эксперименты с бускульской, карасорской и экибастузской глинами без добавления микросилики (таблица 5).

На втором этапе в экспериментах использовались бускульская, карасорская и экибастузская глины фракции от 0 до 3 мм с добавлением микросилики.

На третьем этапе исследований в шихту добавляли калкаманскую и карасорскую глину без микросилики.

Полученные результаты (№ 5 и 16, табл. 6) сравнивались с базовым вариантом производства агломератов из хромовой руды в условиях АксЗФ, где в качестве флюса используется оборотный и строительный песок (№ 24 и 26, таблица 6).

В отличие от "базовой" технологии, удельная производительность агломашины возрастала с 0,626 до 1,08 т/м³·ч, а при использовании глин совместно с микросиликой (таблица 6), наряду с ростом производительности отмечено улучшение увеличения выхода годной фракции +8 мм и прочностных характеристик агломерата (на 4 и 2%, соответственно). Добавка к глинам микросилики в количестве 2% позволила достичь максимальных значений скорости спекания (№14, таблица 5 и 6). При использовании карасорской глины в количестве 3, 5, 7% от массы шихты (таблица 5, №5 – 6 этап 1, таблица 6 №5 – 6) прочность агломерата менялась в пределах 62 – 67 %. С увеличением количества карасорской глины до 7% выход годного находится в пределах 80 – 82%, а с добавлением микросилики в количестве 2% при содержании в шихте глины 3% он увеличивается до 84%. Добавка глин в аглошихту способствовала увеличению удельной производительности аглоустановки во всех случаях. Рост производительности во всех спеканиях был обусловлен увеличением степени окомкования шихт на 7 – 12,5% по сравнению с базовой шихтой. Достигнутая удельная производительность аглоустановки с использованием аглошихты с калкаманской глиной составила 0,972 т/(м²·ч), (что выше чем в базовом варианте на 55 %), а в варианте с карасорской глиной составила 1,08 т/(м²·ч).

Таблица 5 – Составы аглошихт для опытных спеканий

| Этапы | № | Состав аглошихты, % | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------|------------------|------------|----------------------|---------|--------|-----------------|
| | | Хромовая руда | Глина бускульская | Глина карасорская | Глина экибастузская | Глина калкаманская | Микросилика | * Обратный песок | * Бентонит | * Строительный песок | Возврат | Коксик | Влажность шихты |
| 1 | 1 | 65 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 2 | 63 | 5 | - | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 3 | 61 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 4 | 65 | - | 3 | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 5 | 63 | - | 5 | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 6 | 61 | - | 7 | - | - | - | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 7 | 68 | - | - | 5 | - | - | - | - | - | 20 | 7 | 7 |
| | 8 | 63 | - | - | 10 | - | - | - | - | - | 20 | 7 | 7 |
| | 9 | 68 | - | 5 | - | - | - | - | - | - | 20 | 7 | 7 |
| | 10 | 63 | - | 10 | - | - | - | - | - | - | 20 | 7 | 7 |
| 2 | 11 | 58,5 | 2,5 | - | - | - | 2 | - | - | - | 30 | 7 | 8 |
| | 12 | 68 | 3 | - | - | - | 2 | - | - | - | 20 | 7 | 7,5 |
| | 13 | 65,5 | 4 | - | - | - | 3,5 | - | - | - | 20 | 7 | 7 |
| | 14 | 63 | - | 3 | - | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 15 | 62 | - | 4 | - | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 16 | 61 | - | 5 | - | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 17 | 63 | - | - | 3 | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 18 | 62 | - | - | 4 | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| | 19 | 61 | - | - | 5 | - | 2 | - | - | - | 25 | 7 | 8 |
| 3* | 20 | 68 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 25 | 6 | 8 |
| | 21 | 68 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 25 | 6 | 8 |
| | 22 | 66 | - | - | - | 3 | - | - | - | - | 25 | 6 | 8 |
| | 23 | 66 | - | - | - | 5 | - | 2 | - | - | 25 | 6 | 8 |
| | 24 | 56 | - | - | - | - | - | 8 | - | - | 30 | 6 | 8 |
| | 25 | 61 | - | - | - | - | - | 5 | 3 | - | 25 | 6 | 8 |
| | 26 | 61 | - | - | - | - | - | - | - | 8 | 25 | 6 | 8 |

*20 – 26 – по данным Аксуского завода ферросплавов

В результате проведенных серий опытных спеканий установлено, что применение глин взамен кварцита, а также сочетаний глин с микросиликой взамен кварцита с микросиликой, позволяет сохранить прочность готового агломерата на сопоставимом с действующей технологией уровне (примерно 62 – 67%).

Таблица 6 – Результаты опытных спеканий

| Этапы | №* | Показатели | | | | Максимальная температура отходящих газов, °С*** |
|-------|------|-----------------------------|--|----------------------------|---------|---|
| | | Выход годного агломерата, % | Производительность т/м ² ·ч | Прочностные характеристики | | |
| | | | | +5 мм | –0,5 мм | |
| 1 | 1 | 69 | 0,60 | 53 | 8 | 379 |
| | 2 | 74 | 0,85 | 64 | 8 | 337 |
| | 3 | 76 | 0,93 | 64 | 8 | 340 |
| | 4 | 80 | 0,89 | 62 | 8 | 360 |
| | 5 | 80 | 1,08 | 67 | 8 | 361 |
| | 6 | 82 | 1,10 | 67 | 8 | 352 |
| | 7 | 72 | 0,90 | 52 | 11 | 386 |
| | 8 | 79 | 0,88 | 50 | 9 | 376 |
| | 9 | 77 | 0,96 | 55 | 10 | 413 |
| | 10 | 71 | 0,86 | 61 | 12 | 404 |
| 2 | 11 | 80 | 0,91 | 66 | 11 | 405 |
| | 12 | 70 | 0,90 | 64 | 15 | 313 |
| | 13 | 86 | 0,86 | 65 | 15 | 339 |
| | 14 | 84 | 0,94 | 64 | 10 | 312 |
| | 15 | 81 | 0,96 | 60 | 10 | 312 |
| | 16 | 78 | 0,93 | 57 | 12 | 295 |
| | 17 | 80 | 1,01 | 55 | 11 | 273 |
| | 18 | 79 | 0,86 | 59 | 14 | 280 |
| | 19 | 80 | 0,83 | 61 | 14 | 299 |
| 3 | 20** | 70 | 0,73 | 64 | 12 | 372 |
| | 21** | 67 | 0,692 | 64 | 14 | 342 |
| | 22** | 66 | 0,782 | 66 | 12 | 349 |
| | 23** | 70 | 0,972 | 63 | 14 | 375 |
| | 24** | 67 | 0,626 | 67 | 15 | 372 |
| | 25** | 71 | 1,223 | 64 | 12 | 368 |
| | 26** | 68 | 0,725 | 65 | 13 | 367 |

* Номера соответствуют составам шихт в таблице 5

** 20–26 – по данным АО "Аксуский завод ферросплавов"

*** Максимальная температура в слое изменялась в пределах 1350 – 1450°С

Применение карасорской глины позволяет увеличить в среднем производительность агрегата на 19 % за счет роста скорости спекания по сравнению с базовым вариантом.

Глава 4. Изучение механизма формирования спека хромовой руды с добавлением силикатных и алюмосиликатных флюсов

В четвертой главе изучен механизм влияния силикатных и алюмосиликатных флюсов на снижение температур спекания хромовой руды. Для исследования влияния

флюсов на формирование структуры связки хромового агломерата для электронно-микроскопического исследования и рентгенофазового анализа были отобраны образцы исходных глин и спеки рудного сырья с одинаковым содержанием флюсов: микросилики, экибастузской, карасорской и бускульской глин в количестве 10 % мас. от количества рудной мелочи. По микроструктуре они представлены типичными для глин слоистыми зернами, сложенными из отдельных тонких чешуек диаметром 0,5–10 мкм. Для электронно-микроскопического исследования спеченных отсевов хромита с 10 % мас. связки были подготовлены свежие сколы.

Наиболее контрастная визуализация морфологии зерен и связки получена при работе микроскопа в режиме отраженных электронов (рисунок 2).

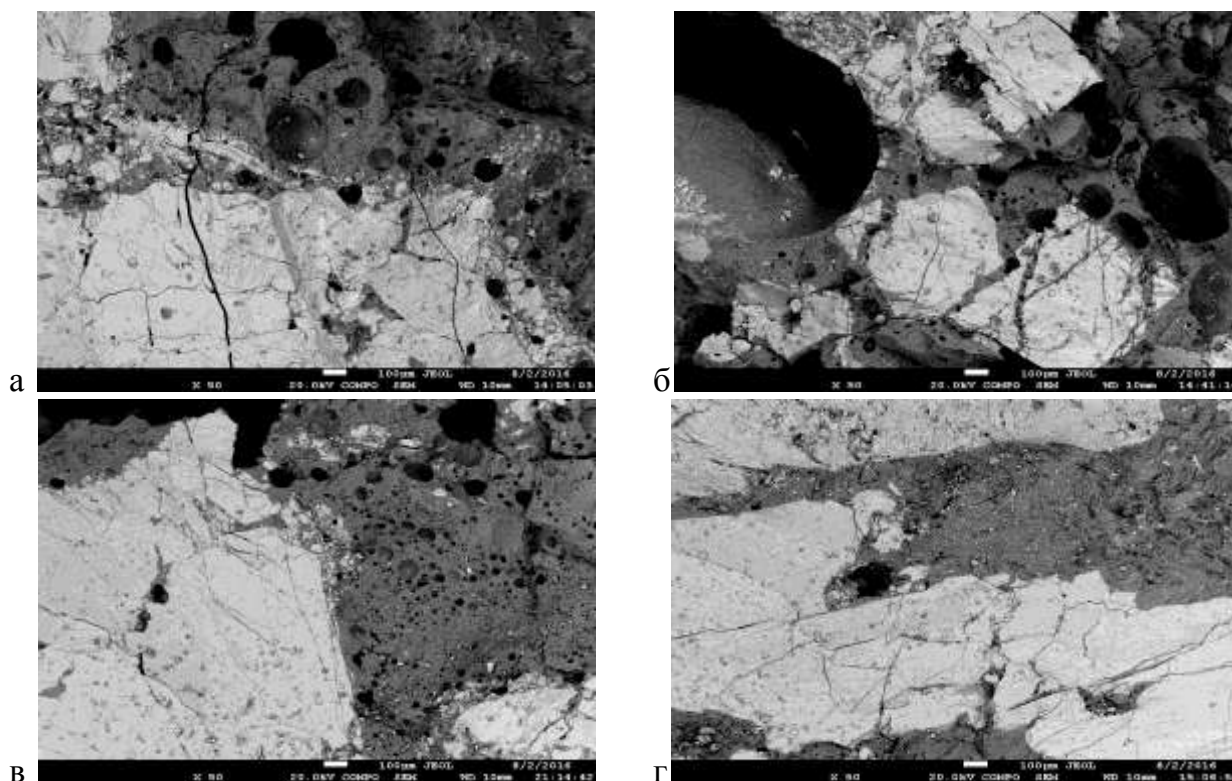


Рисунок 2 – Микроструктура спеченных образцов хромовой руды с добавкой 10% флюса в отраженных электронах: бускульской глины (а), карасорской глины (б), экибастузской глины (в) и микросилики (г)

На всех изображениях более светлым областям соответствуют зерна фазы, содержащей более тяжелые элементы (хромит), а более темным областям – силикатные фазы. Черным отображаются поры в силикатном расплаве.

Добавление всех флюсов в количестве 10% мас. существенно (на 310–370 °С) снижает температуры размягчения хромитовой руды (таблица 3). Было установлено, что химический состав связки аналогичен при добавке всех типов флюсов: наблюдается обогащение цементирующей силикатной фазы оксидом магния и железа, переходящих из зерен хромшпинелида.

Более детальное изучение различных алюмосиликатных глин, продиктованное необходимостью их сравнения, было проведено на основе фазового состава исходных материалов и руды, а также образцов руды с добавкой 10 % мас. глин после спекания; исследование проведено методом порошковой рентгеновской дифракции.

Результаты рентгенофазового анализа представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Результаты рентгенофазового анализа глины

| Образец глины | Фазы | | | | |
|---------------------|-------|----------|----------|---------|--------|
| | Кварц | Мусковит | Каолинит | Кальцит | Альбит |
| Глина карасорская | 29,6 | 30,8 | 39,6 | - | - |
| Глина экибастузская | 52,2 | 14,3 | 20,9 | 3,5 | 9,1 |
| Глина бускульская | 15,7 | 12,3 | 72,0 | - | - |

Таблица 8 – Результаты рентгенофазового анализа спеченных образцов

| № п/п | Образец: Руда+10% | Фазы | | | | | | |
|-------|----------------------|------------------|-----------|-------|-------------|----------|--------|---------------|
| | | Хромит (шпинель) | Форстерит | Кварц | Кристобалит | Энстатит | Муллит | Клиноэнстатит |
| 1 | Микросилика | 45,8 | 24,3 | 0,3 | - | 9,7 | - | 19,9 |
| 2 | Глина карасорская | 77,0 | 21,1 | 1,9 | - | - | - | - |
| 3 | Глина экибастузская | 50,5 | 42,9 | 1,5 | 1,9 | 3,2 | - | - |
| 4 | Глина бускульская | 29,8 | 49,2 | 0,5 | - | 15,0 | 5,5 | - |

Из данных, представленных в таблице 7, следует, что близкие по химическому составу и относящиеся к одному типу каолиновые глины существенно отличаются по фазовому составу. В составе связки наблюдается значительное количество магниевое оливина (форстерита) Mg_2SiO_4 , относительная доля которого при применении микросилики и карасорской глины примерно в 2 раза меньше, чем при применении экибастузской и бускульской глин. Во всех образцах присутствует незначительное количество кварца в составе связки.

Данные рентгеноструктурного микроанализа (РСМА) и рентгенофазового анализа (РФА) не позволяют однозначно определить причины относительного преимущества отдельных флюсов. Поэтому для изучения процесса спекания нами дополнительно был проведен дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализ образцов рудного сырья с добавлением силикатных и алюмосиликатных флюсов.

Результаты дифференциально-термического анализа образцов материалов и их смесей представлены на рисунках 3 – 5. Все исходные компоненты аглошихты теряют первые порции влаги при температурах 105 – 155°C (рисунок 3 – 5). Эндотермический и экзотермический эффекты в образце хромовой руды в диапазоне 650 – 700°C и 800 – 850°C связаны с разложением серпентина с выделением паров воды и выделением SiO_2 при распаде обезвоженного серпентина. При дальнейшем нагреве хромовой руды в интервале температур 1000 – 1500°C в результате взаимодействия $2MgO \cdot SiO_2 + SiO_2 \rightarrow 2(MgO \cdot SiO_2)$ исчезает фаза SiO_2 , но образуется новая фаза $MgO \cdot SiO_2$ клиноэнстатит и происходит окисление хромита. В интервале температур 1050 – 1100°C происходит образование раствора Fe_2O_3 в Cr_2O_3 с перестройкой решетки исходного хромита.

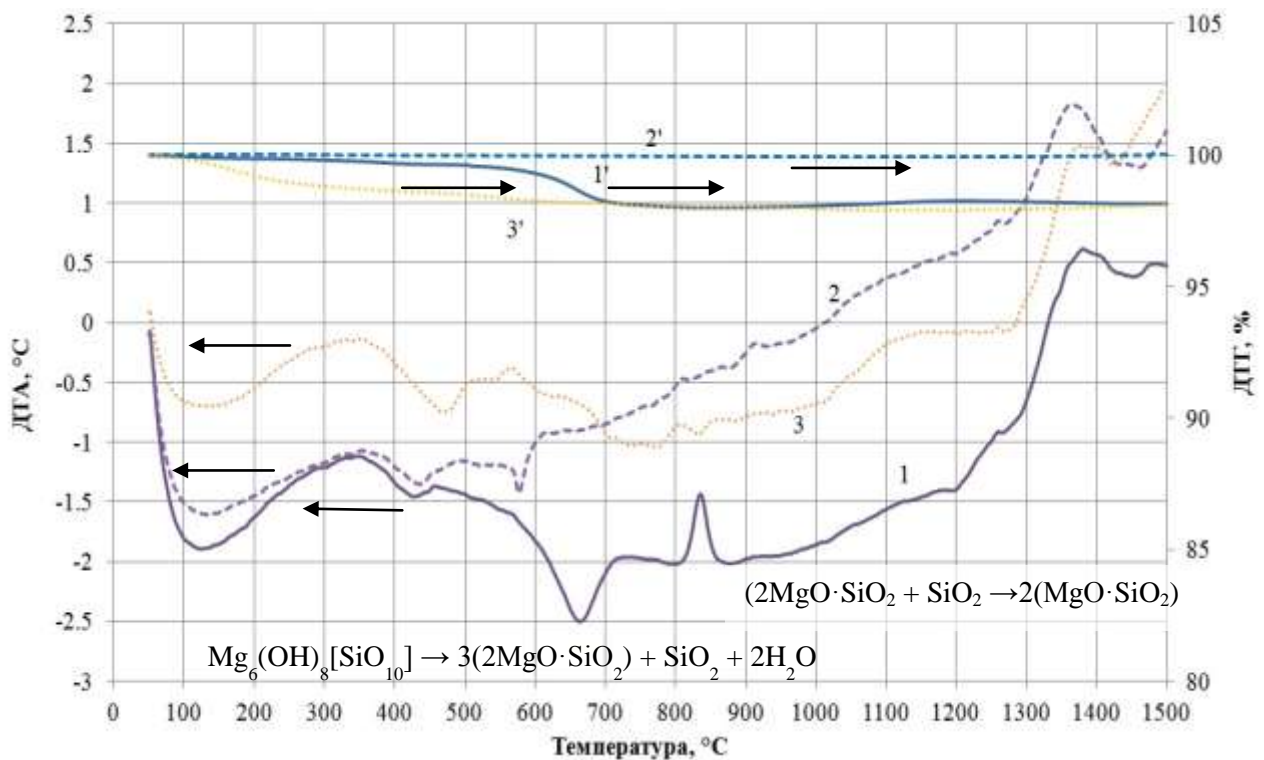


Рисунок 3 – Результаты ДТА образцов:
 1 – хромовая руда; 2 – кварцит; 3 – микросилика; обозначения со штрихом' – данные ДТГ для соответствующих материалов.

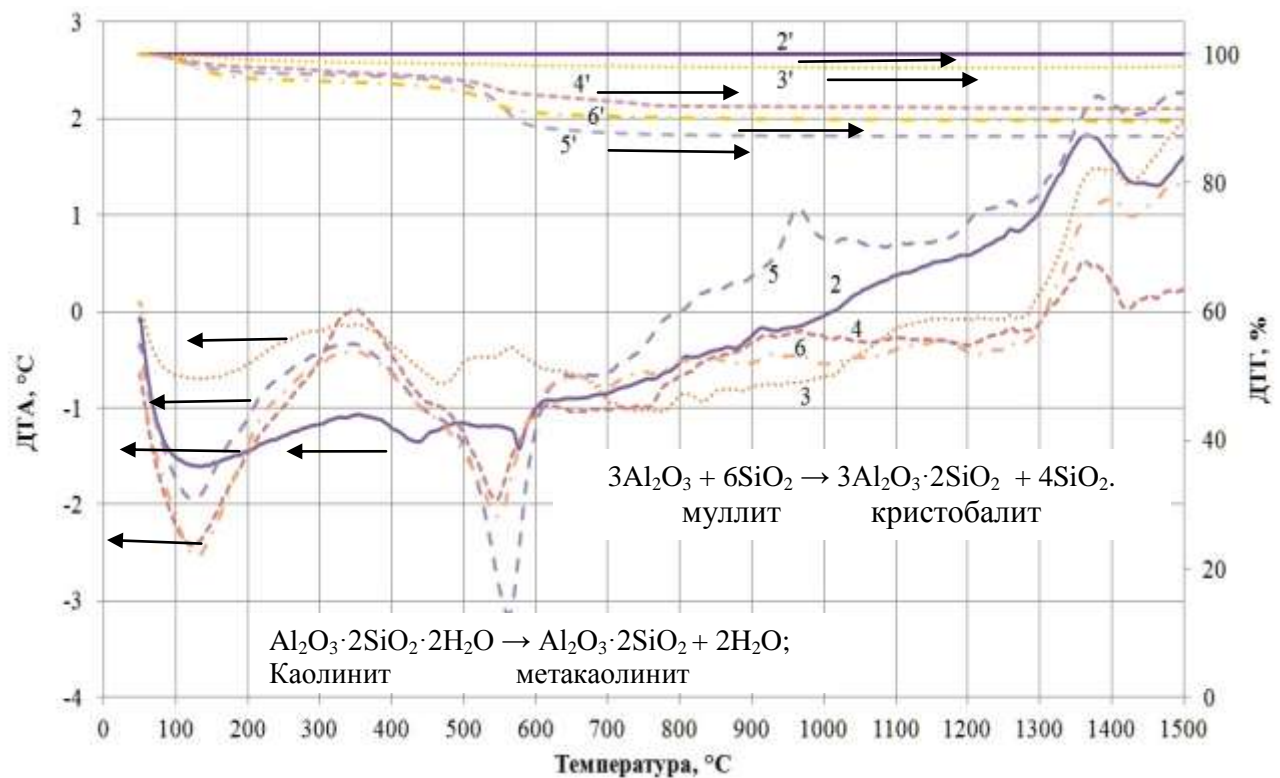


Рисунок 4 – Результаты ДТА флюсов:
 2 – кварцит; 3 – микросилика; 4 – экибистузская глина; 5 – бускульская глина; 6 – карасорская глина; обозначения со штрихом' – данные ДТГ для соответствующих материалов.

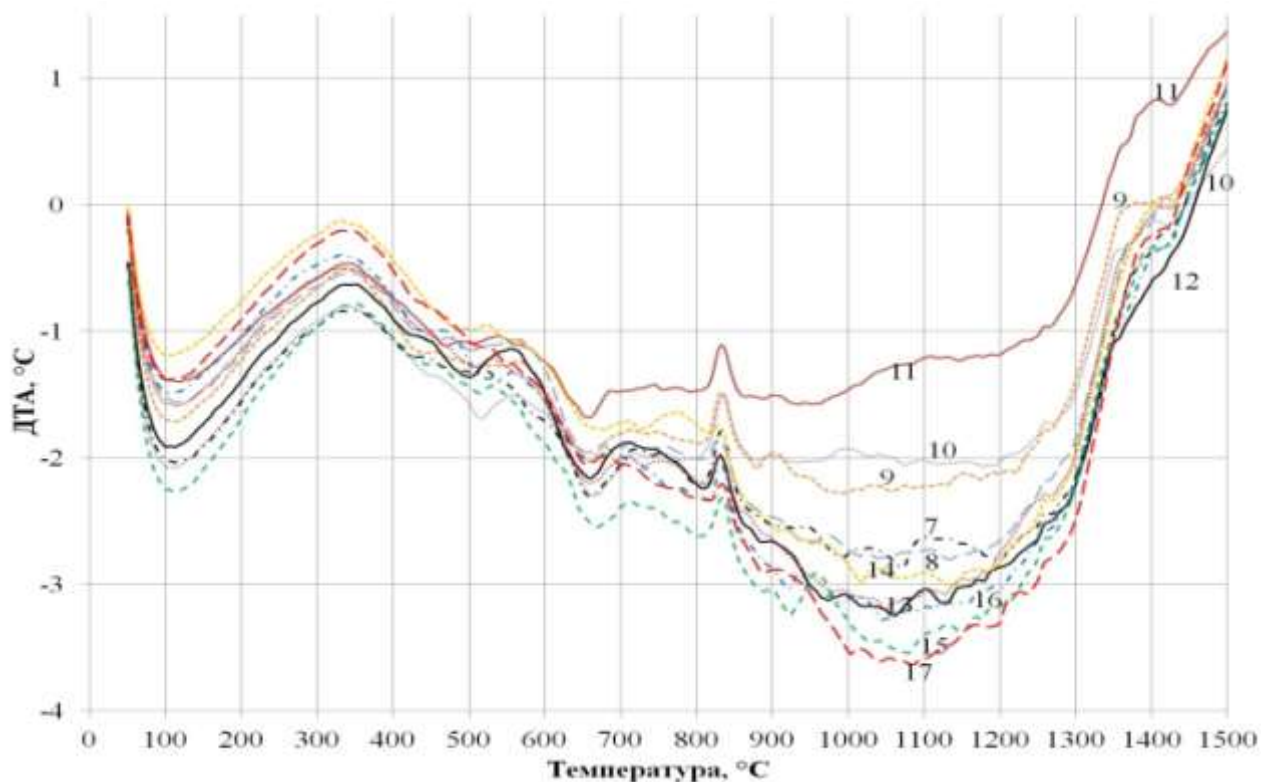


Рисунок 5 – Результаты ДТА образцов хромовой руды с добавкой флюсов 7 и 8 – хромовая руда + 5% кварцита и микросилики, соответственно; 9 – 11 – хромовая руда + 5% глины экибастузской, бускульской и карасорской, соответственно; 12 – 14 – хромовая руда + 2% микросилики + 5% глины экибастузской, бускульской и карасорской, соответственно; 15 – 17 – хромовая руда + 2% кварцита + 5% глины экибастузской, бускульской и карасорской, соответственно.

При нагревании кварцита в диапазоне температур 560 – 600°C наблюдается отрицательный тепловой эффект, связанный с мгновенным (скачкообразным) энантиотропным превращением α -кварц \rightleftharpoons β -кварц при 575°C с изменением объема $\Delta V = +0,80\%$. Подобного превращения при нагреве микросилики не происходит, поскольку она представлена главным образом аморфным кремнеземом. Эндотермические эффекты в диапазоне 500 – 600°C образцов всех глин связаны с распадом каолинита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Величина пика прямо пропорциональна количеству каолинита в составе глин.

Дегидратация каолинита с образованием метакаолинита (рисунок 4), начинается при 400 – 450°C и заканчивается лишь при 900 – 1100°C. Параллельно с обезвоживанием идет распад метакаолинита (при 800 – 900°C) и образование муллита (1050 – 1250°C). Положительный тепловой эффект, наблюдаемый у бускульской глины в интервале 930 – 1000°C связан непосредственно с образованием муллита, наличие которого в спеченных образцах хромитовой руды с бускульской глиной было обнаружено методом РФА.

При добавлении флюсов при температурах выше 800 – 850°C происходит взаимодействие SiO_2 флюсов с MgO и Al_2O_3 пустой породы руды, приводящее к началу спекания (усадке) материала при температурах выше 1100°C. При нагреве образцов хромовой руды с различным количеством и типом флюсов до температуры 900°C (рисунок 5) наблюдаются тепловые эффекты, характерные для чистых материалов при соответствующих температурах. При этом, в отличие от ДТА чистых

материалов без добавок, где с ростом температуры имеется тенденция положительного теплового эффекта, наблюдается общее увеличение отрицательного теплового эффекта для всех образцов при температуре выше 900°C. При температуре выше 1100°C начинается усадка (размягчение) образцов хромовой руды с флюсами.

Установлено, что доля стекловидной фазы в составе связки спеченных образцов хромовой руды не превышает 20 – 40% при добавке всех видов флюсов. Химический состав связки в целом аналогичен для всех вариантов флюсов: наблюдается обогащение цементирующей силикатной фазы оксидом магния и железа. Показано, что каолиновые глины существенно отличаются по фазовому составу и повышенное количество каолинита и мусковита в них способствует улучшению показателей окомкования и, в дальнейшем, спекания хромовой руды.

Показано, что добавление глин в состав аглошихты демонстрирует меньший по величине эндотермический эффект в интервале температур 900 – 1300°C по сравнению с "классическими" силикатными флюсами, а сочетание в составе флюса глин и микросилики позволяет увеличить концентрацию SiO₂ в составе шихты, улучшить параметры спекания (сопоставимыми с точки зрения влияния на температуры конца размягчения хромовой руды является добавки глин в количестве 5% и 2% микросилики с 10% кварцита (–2 мм), а в количестве 10 % глин снижает температуры конца размягчения на 220 – 230°C) и уменьшить эндотермический эффект офлюсования по сравнению с добавкой "традиционного" флюса – кварцита.

Глава 5. Выплавка высокоуглеродистого феррохрома из опытного агломерата в рудовосстановительной электропечи мощностью 1,2 МВ·А

В пятой главе приведены результаты выплавки высокоуглеродистого феррохрома в рудовосстановительной электропечи из опытных партий хромового агломерата общим количеством 11,1 т. Опытно-промышленные эксперименты проведены на экспериментально-промышленном участке цеха №2 АО "АкцЗФ".

Составы аглошихт приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Составы аглошихт, %

| № п/п | Рудная часть | | Кокс | Карасорская глина | Микросилика | Этапы кампании |
|-------|--------------|---------|------|-------------------|-------------|----------------|
| | руда | возврат | | | | |
| 1 | 100 | - | 7 | 5 | - | I |
| 2 | 75 | 25 | 7 | 5 | - | |
| 3 | 100 | - | 7 | 5 | 2 | II |
| 4 | 75 | 25 | 7 | 5 | 2 | |

При выплавке высокоуглеродистого феррохрома на I и II этапах кампании применялись агломераты, полученные как с наличием возврата, так и без него. Перед проведением опытных плавок был определен ориентировочный химический состав агломерата для различных этапов опытно-промышленной кампании (таблица 10). В таблице 11 приведены прочностные характеристики агломерата, подготовленного для выплавки феррохрома.

Таблица 10 – Расчетный химический состав агломерата, %

| № этапа | Cr ₂ O ₃ | Fe _{общ} | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | P | C | Cr : Fe |
|---------|--------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|------|---------|
| I | 46,32 | 9,47 | 13,17 | 5,92 | 21,62 | 0,77 | 0,018 | 1,21 | 3,34 |
| II | 45,26 | 9,40 | 14,92 | 5,79 | 21,15 | 0,76 | 0,018 | 1,23 | 3,29 |

Таблица 11 – Показатели производства применяемого агломерата

| Этапы кампании | Выход годного агломерата, % | Удельная производительность т/м ² ·ч | Прочностные характеристики | |
|----------------|-----------------------------|---|----------------------------|---------|
| | | | +5 мм | -0,5 мм |
| I | 80 | 1,08 | 67 | 8 |
| II | 78 | 0,93 | 57 | 12 |

Кампания по выплавке высокоуглеродистого феррохрома состояла из несколько этапов:

- I. Работа с использованием агломерата из мелочи хромовой руды с добавлением в качестве флюса 5% карасорской глины;
- II. Работа с использованием агломерата из мелочи хромовой руды с добавлением в качестве флюса 5% карасорской глины и 3% микросилики;
- III. Работа на мелочи хромовой руды концентрат Донского горно-обогатительного комбината (ДХ-1-4, фракция 0–10 мм) без использования агломерата.

Шихтовый режим работы рудовосстановительной электропечи в различные этапы опытно-промышленной кампании приведен в таблице 12.

Технико-экономические показатели процесса выплавки высокоуглеродистого феррохрома приведены в таблице 13.

Таблица 12 – Состав шихты по периодам опытной кампании

| Периоды опытной кампании | Масса компонента, кг | | | | |
|--------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------|--------------|
| | Хроморудное сырье | | | Кокс | Флюс (песок) |
| | агломерат | кусовая руда (ДХ-1-4, 10 – 160 мм) | рудная мелочь (ДХ-1-4, 0 – 10 мм) | | |
| Разогрев | - | 1000 | - | 200 | 30 |
| I этап | 1000 | - | - | 200 | 30 |
| II этап | 1000 | - | - | 200 | 30 |
| III этап | - | - | 1000 | 200 | 50 |

Таблица 13 – Технико-экономические показатели выплавки

| Параметр | Этапы | |
|---|------------------------|-------|
| | Σ (I и II) | III |
| Вес слитков металла, т | 5,5 | 4,5 |
| Вес подсыпки, т | 2,5 | 3,5 |
| Вес металла за вычетом подсыпки, т | 3 | 1 |
| Общий съём электроэнергии, кВт·ч | 18000 | 13600 |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т хрома | 9346 | 19182 |
| Вес шлака, т | 6,5 | 5,7 |
| Кратность шлака | 2,16 | н.д. |
| Содержание хрома в сплаве, % | 64,63 (I) и 62,40 (II) | 70,9 |
| Степень извлечения хрома в сплав, % | 68,44 (I) и 74,16 (II) | 41,43 |

В целом проведённая опытно-промышленная кампания показала возможность выплавки из хромового агломерата феррохрома с содержанием хрома выше 60%, востребованного на рынке. Для оценки конкурентоспособности опытных партий агломерата в сравнении с производящимся в настоящее время в АксЗФ агломератом (базовыми вариантами) нами проведены ориентировочные технико-экономические расчеты и стоимостной подход. Сравнение эффективности предлагаемой технологии проведено расчетным путем для двух опытных вариантов агломерата (I и II) четырех базовых (III – VI), типичных для условий работы АксЗФ (таблица 14).

Таблица 14 – Варианты агломератов для расчетного сравнения

| вариант | флюсы |
|-------------|---------------------------------------|
| I опытный | 5% карасорской глины |
| II опытный | 5% карасорской глины + 2% микросилики |
| III базовый | 5% кварцит |
| IV базовый | 5% кварцит + 2% микросилики |
| V базовый | 8% строительного песка |
| VI базовый | 8% оборотного песка |

Выход годного опытных агломератов находится на уровне 80%, в то время как базовые варианты – на уровне 67%. В качестве агломерата, с которым производилось сравнение, был выбран базовый вариант VI с оборотным песком в качестве флюса и наименьшей удельной производительностью агломашины (рисунок 6). Сравнение относительного прироста производительности выгодно отличает предлагаемые опытные варианты агломератов I и II от базовых III – VI. Важное значение для металлургической ценности хроморудного сырья имеет содержание в нем Cr_2O_3 , а также стоимость в сравнении с богатой кусковой рудой и мелочью (рисунок 7).

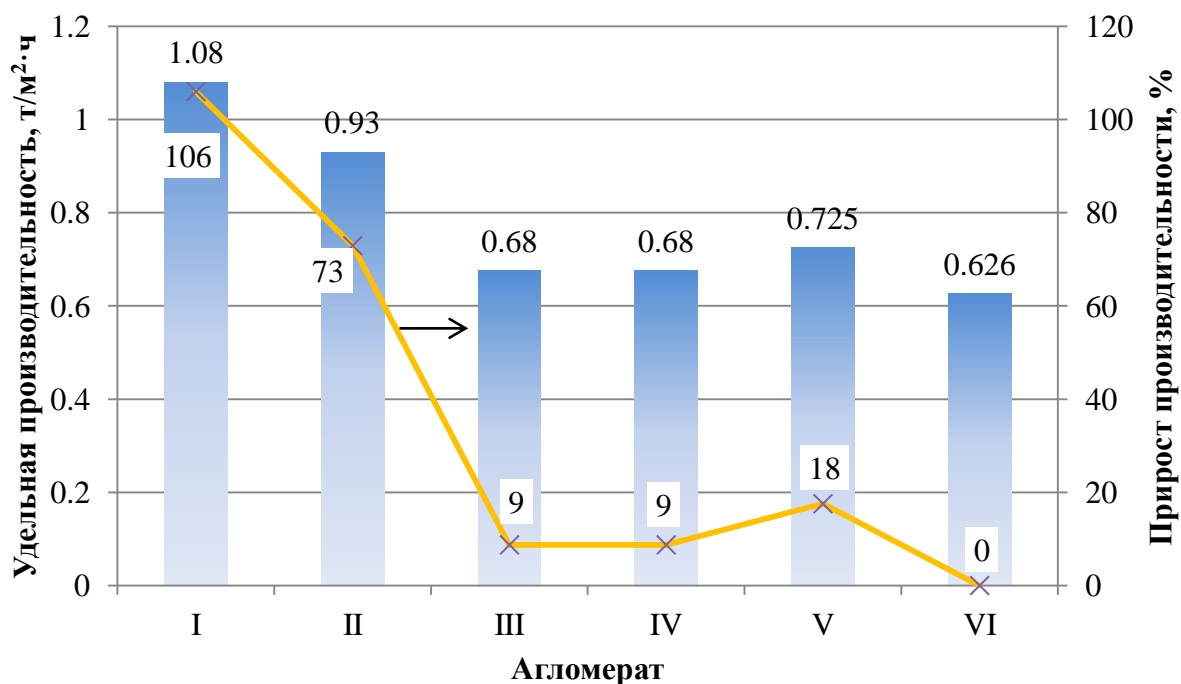


Рисунок 6 – Удельная производительность и ее прирост в сравнении с базовым вариантом производства агломерата VI

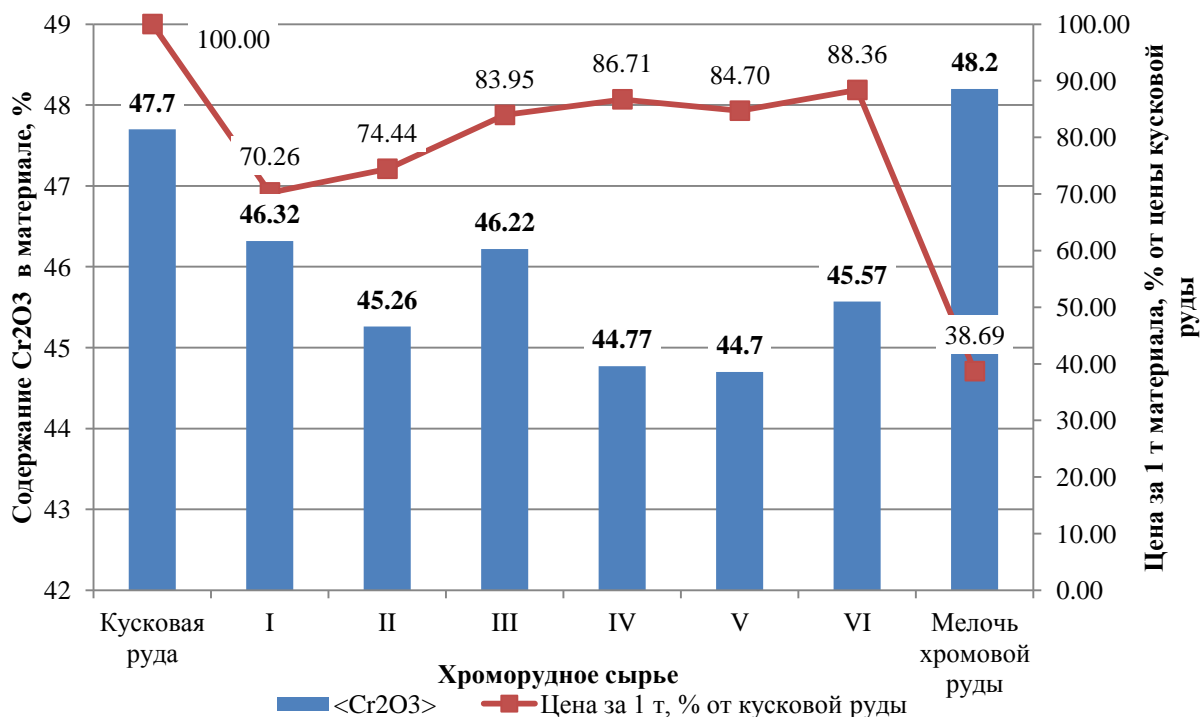


Рисунок 7 – Содержание Cr₂O₃ в сырье и его стоимость в сравнении с богатой кусковой хромовой рудой.

Эквивалентное соответствие материалов кусковой хромовой руде по содержанию Cr₂O₃ и стоимости приведено на рисунке 8.

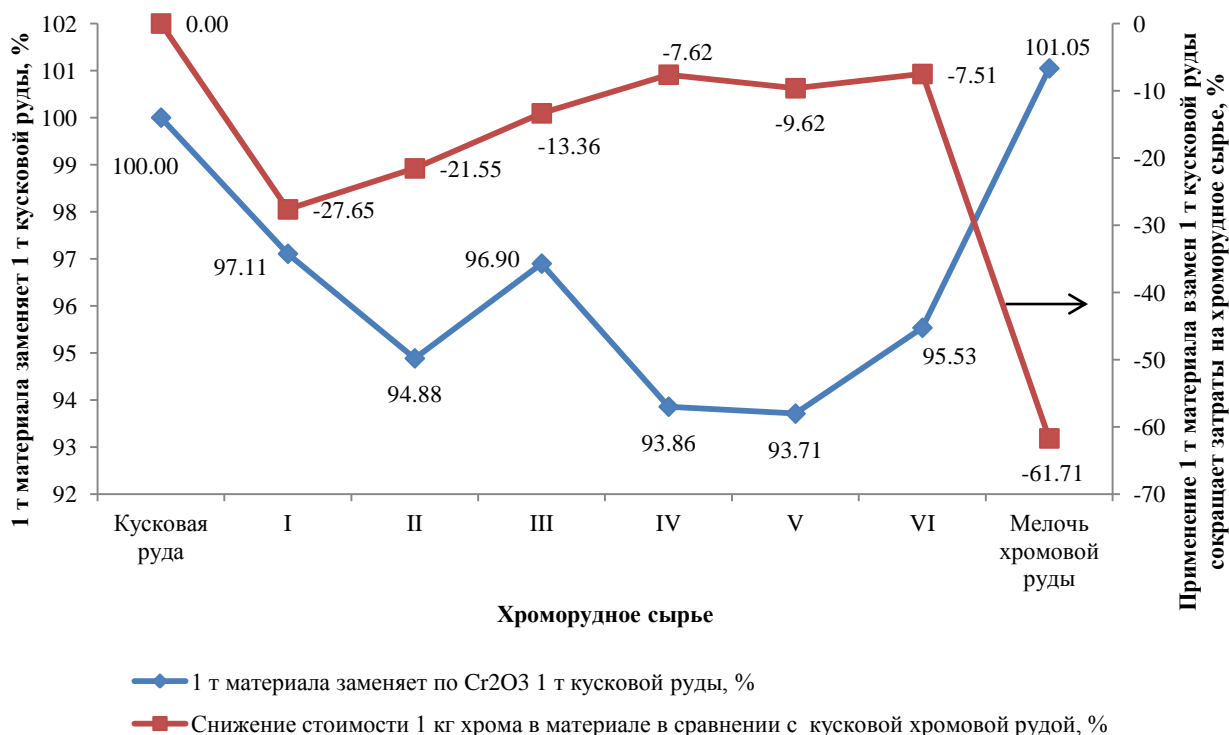


Рисунок 8 – Соответствие различного сырья по содержанию Cr₂O₃ и сокращение затрат при его использовании в сравнении с 1 т кусковой хромовой руды, %

По своему химическому составу агломераты I и II, полученные по опытной технологии, позволяют получить стандартный феррохром (более 62% хрома), что подтверждено актом испытаний АксЗФ. Возможность работы на 100% агломерата в составе шихты рудовосстановительных электропечей требует проведения ряда опытно-промышленных и промышленных испытаний и исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов физико-химических исследований установлено, что применение алюмосиликатных глин позволяет существенно повысить скорость спекания мелочи хромовой руды и выход годного агломерата. В результате выполнения исследовательской работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложено применение алюмосиликатных глин и их смесей с микросиликой при агломерации мелочи хромовых руд в качестве флюсов.

2. Изучено и проанализировано влияние различных по своему составу и количеству флюсов и их смесей на температуры начала и температурный интервал размягчения хромовой руды; установлено преимущество глин по сравнению с традиционными флюсами.

3. На основе результатов экспериментов по спеканию мелочи хромовой руды преимущество алюмосиликатных глин и их смесей с микросиликой по сравнению с «классическими» добавками (кварцитом, микросиликой, строительным песком и др.).

4. В результате изучения микроструктуры (РСМА) и фазового состава (РФА) исходных компонентов и спеков руды с флюсом с применением современного оборудования проведено сравнение фазового состава исходных флюсов и спеков хромовой руды, полученных с использованием различных флюсов и установлено, что связка хромового агломерата представлена, главным образом, силикатами магния.

5. На основе проведенного дифференциально-термического анализа (ДТА) в интервале температур от 50 до 1500°C определены температурные интервалы интенсивного формирования аглоспека и температуры термических превращений в исходных компонентах аглошихты и смесях руды с флюсами и установлена взаимосвязь добавок силикатных и алюмосиликатных флюсов с изменением теплового эффекта образцов хромовой руды в высокотемпературном интервале (1100 – 1500°C) и результатами опытных спеканий аглошихт.

6. В результате расчетов и экспериментальных исследований (химического состава получаемого агломерата; влияния на температуры размягчения / спекания; серии опытных спеканий, анализа микроструктуры и фазового состава, а также дифференциально-термического анализа) установлены преимущества использования алюмосиликатных глин и их смесей с микросиликой в качестве флюсов.

7. С применением карасорской глины и ее смеси с микросиликой, показавших наилучшие результаты в качестве флюсующего материала по результатам лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, были подготовлены 2 партии агломерата общей массой 11,1 т и проведено испытание технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома на печи мощностью 1,2 МВ·А. Установлена принципиальная возможность получения стандартного высокоуглеродистого феррохрома (>62% Cr) при работе на шихте со 100% хромового агломерата в составе рудной части. Внедрение предложенной технологии агломерации в случае соответствия промышленных показателей продемонстрированным опытно-

промышленным может увеличить производительность аглоустановки на 19 %. На предложенные усовершенствования технологии агломерации и результаты плавок высокоуглеродистого феррохрома из опытного агломерата оформлен акт испытаний от АО «АкзФ».

8. Ряд вариантов составов аглошихты для производства хромового агломерата защищены патентом Республики Казахстан.

9. Рассчитана технико-экономическая эффективность замены базового агломерата опытным агломератом, приведено сравнение с кусковой рудой.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Дальнейшую работу по тематике диссертации, возможно, продолжить в следующих направлениях:

1. Реализация предложенной технологии агломерации мелочи хромовой руды с добавкой алюмосиликатных глин в промышленных условиях.

2. Разработка технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома с применением 100% агломерата в составе рудной части шихты.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Нурмаганбетова Б.Н. Совершенствование производства хромового агломерата / Е.В. Максимов, М.Ф. Витущенко, И.А. Вернер, Б.Н. Нурмаганбетова, А.К. Торговец, Ж.О. Нурмаганбетов // Сталь. 2010. – №6. – С. 6 – 8. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

Nurmaganbetova B.N. Improving the production of chrome sinter / E.V. Maksimov, M.F. Vituschenko, I.A.Verner, B.N. Nurmaganbetova, A.K. Torgovets, Z.O. Nurmaganbetov // Steel in translation, June 2010. – Vol. 40, No. 6, pp. 549 – 551.

2. Нурмаганбетова Б.Н. Оценка влияния добавки различных видов флюсов на химический состав хромового агломерата / Б.Н. Нурмаганбетова, И.Н. Кель, А.В. Жданов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. – №9. – С. 70 – 71. (0,05 п.л. / 0,02 п.л.)

3. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение влияния добавок алюмосиликатных и силикатных материалов на температуры размягчения хромитовой руды / Жданов А.В., Нурмаганбетова Б.Н., Павлов В.А. // Металлы. 2015. – №4. – С. 3 – 8. (0,37 п.л. / 0,2 п.л.)

Nurmaganbetova B.N. Effect of Additions of Aluminosilicate and Silicate Materials on the Softening Temperature of Chromite Ore / A.V. Zhdanov, B.N. Nurmaganbetova, V.A. Pavlov // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2015, No. 7, pp. 511 – 515.

4. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение процесса агломерации мелочи хромовой руды Донского ГОКа с применением в качестве флюсующих материалов алюмосиликатных глин / А.Г. Калиакпаров, А.В. Суслов, Б.Н. Нурмаганбетова, Ю.Г. Ярошенко, Л.И. Каплун, А.В. Жданов // Сталь. 2016. – №7. – С. 2 – 7. (0,31 п.л. / 0,17 п.л.)

5. Нурмаганбетова Б.Н. Выплавка высокоуглеродистого феррохрома из хромового агломерата, полученного с использованием алюмосиликатных флюсов / А.Г. Калиакпаров, А.В. Суслов, Б.Н. Нурмаганбетова, Ю.Г. Ярошенко, А.В. Жданов, Ж.О. Нурмаганбетов // Сталь. 2017. – №1. – С. 30 – 34. (0,31 п.л. / 0,17 п.л.)

Nurmaganbetova B. N. Smelting of High-Carbon Ferrochrome from Chromium Agglomerate Produced with Alumina-Silica Flux / A. G. Kaliakparov, A. V. Suslov, B. N. Nurmaganbetova, Yu. G. Yaroshenko, A. V. Zhdanov, Zh. O. Nurmaganbetov ISSN 0967-0912, Steel in Translation, 2017, Vol. 47, No. 1, pp. 65 – 69.

6. Нурмаганбетова Б.Н. Влияние добавки силикатных и алюмосиликатных флюсов на структуру и фазовый состав хромового агломерата / А.В. Жданов, С.А. Петрова, Б.Н. Нурмаганбетова, Д.А. Жеребцов // *Металлы*, 2017. – №3. – С. 8 – 16. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.)

7. Нурмаганбетова Б.Н. Зависимость термических превращений в мелочи хромовой руды Донского ГОКа от добавки силикатных и алюмосиликатных флюсов / А.В. Жданов, Л.И. Каплун, С.А. Петрова, Б.Н. Нурмаганбетова, К.В. Глинкина // *Металлы*, 2017. – №4. – С. 3–11. (0,35 п.л. / 0,2 п.л.)

Патенты:

8. Пат. 25312 Республика Казахстан, МПК С22В1/24. Шихта для производства хромового агломерата / Нурмаганбетова Б.Н., Марденов М.П., Максимов Е.В., Нурмаганбетов Ж.О., Калиева Ш.М.; заявитель и патентообладатель ЕИТИ им. акад. К. Сатпаева. – Опубл. 20.12.2011. contacts@kzpatents.com

В других изданиях:

9. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение параметров агломерации мелочи хромовой руды / Ж.О. Нурмаганбетов, Е.В. Максимов, Б.Н. Нурмаганбетова // Сб. тр. Межд. конф. ЕИТИ им. К. Сатпаева Экибастуз, 2006. – С. 257 – 259. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

10. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение процесса окускования отходов ферросплавного производства. / Ж.О. Нурмаганбетов, Е.В. Максимов, Е.С. Абдрахманов, М.Ж. Толымбеков, Б.Н. Нурмаганбетова // Сб. тр. Вестник Казахского национального технического университета им. К. Сатпаева, Алматы, 2007. – №6, – С. 131 – 136. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

11. Нурмаганбетова Б.Н. Выплавка высокоуглеродистого феррохрома из отходов производства / Ж.О. Нурмаганбетов, Е.В. Максимов, Е.С. Абдрахманов, М.Ж. Толымбеков, Б.Н. Нурмаганбетова // Сб. тр. Вестник Казахского национального технического университета им. К. Сатпаева, Алматы, 2007. – №6. – С. 137 – 141. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

12. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение распределения температур в процессе агломерации хромовых руд / Б.Н. Нурмаганбетова, Е.В. Максимов, С.А. Загайнов, Ж.О. Нурмаганбетов // Сб. тр. Межд. конф. ЕИТИ им. К. Сатпаева – Экибастуз, 2012. – С. 253 – 257. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

13. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение влияния фракционного состава на показатели размягчения хромитовой руды донского ГОКа / Б.Н. Нурмаганбетова, В.А. Павлов, А.В. Жданов, И.Н. Кель, Д.А. Лобанов, Е.Ю. Казанцев, Д.А. Панков // Сб. тр. II Межд. интерактивной науч. - практич. конф. «Инновации в материаловедении и металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 256 – 259. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

14. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение температур размягчения алюмосиликатных глин / Б.Н. Нурмаганбетова, В.А. Павлов, А.В. Жданов, И.Н. Кель, Д.А. Лобанов, Е.Ю. Казанцев, Д.А. Панков // Сб. тр. II Межд. интерактивной науч. - практич. конф. «Инновации в материаловедении и металлургии» – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 260 – 263. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

15. Нурмаганбетова Б.Н. Возможности применения агломерата из мелочи хроморудного сырья / Б.Н. Нурмаганбетова, И.Н. Кель, В.А. Павлов, А.В. Жданов // Сб. тр. Межд. науч. - практич. конф. «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса» – Екатеринбург: УрФУ – УГМК, 2013 – С. 54 – 55. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)

16. Нурмаганбетова Б.Н. Влияние добавок силикатных и алюмосиликатных материалов на температуры размягчения хромитовой руды / Б.Н. Нурмаганбетова, В.А. Павлов, А.В. Жданов // Сб. тр. XV Межд. конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали» – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. – ч.2. – С. 134 – 137. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
17. Нурмаганбетова Б.Н. Перспективы применения природного и техногенного сырья Казахстана в качестве флюсующих добавок для агломерации мелочи хромитовых руд / Б.Н. Нурмаганбетова, А.В. Жданов, Е.К. Туйебахов // Сб. тр. межд. конф. «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках XII Сатпаевских чтений. – Экибастуз: ЕИТИ им. академика К. Сатпаева, 2013. – С. 181 – 182. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
18. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение влияния микросилики на температуры размягчения хромитовой руды Донского ГОКа / Б.Н. Нурмаганбетова, В.А. Павлов, В.Ф. Мысик, А.В. Жданов, Д.А. Панков // Сб. тр. Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч. - практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 74 – 76. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
19. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение влияния фракционного состава кварцита на показатели размягчения хромитовой руды Донского ГОКа / Б.Н. Нурмаганбетова, В.А. Павлов, А.С. Михайликов, А.В. Жданов, И.Н. Кель // Сб. тр. Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч. - практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 77 – 79. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
20. Нурмаганбетова Б.Н. Экспериментальное изучение влияния добавок алюмосиликатных глин на характеристики хромового агломерата / Б.Н. Нурмаганбетова, А.В. Жданов // Сб. тр. Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Межд. интерактив. науч. - практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 56 – 59. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
21. Нурмаганбетова Б.Н. Влияние количества флюса на химический состав хроморудного агломерата / Б.Н. Нурмаганбетова, И.Н. Кель, В.А. Павлов, А.В. Жданов, Д.А. Панков, А.С. Колюжин // Сб. тр. Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 60 – 63. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)
22. Нурмаганбетова Б.Н. Изучение влияния альтернативных флюсующих материалов на показатели спекания хромитовой руды Донского ГОКа / Б.Н. Нурмаганбетова, А.В. Жданов // Сб. тр. Межд. конф. «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья», посвященной 90-летию выдающегося ученого, академика АН КазССР, лауреата государственной премии СССР Букетова Евнея Арстановича – Караганда: ХМИ, 2015. – С. 247 – 251. (0,125 п.л. / 0,1 п.л.)