

На правах рукописи



Косдаулетов Нурлыбай

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОФОСФОРИСТЫХ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ
ШЛАКОВ ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД**

Специальность 2.6.2.

Металлургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре пиromеталлургических и литейных технологий.

Научный руководитель: **Рощин Василий Ефимович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЛ «Водородные технологии в металлургии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Официальные оппоненты: **Харченко Александр Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Кель Илья Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов ФГБУН Института металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «18» сентября 2024 г. в 14:00 в ауд. 1001 главного учебного корпуса на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет. Тел. (351) 267-91-61, e-mail: kosdauletovn@susu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/kosdauletov-nurlybay>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент, к.т.н.



Н.А. Шабурова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Производство стали на современном этапе требует не только увеличения объёмов получения продукции, но и освоения более широкого состава сырья для производства стали и ферросплавов. Важным вспомогательным металлом для производства стали является марганец, который используется в качестве раскислителя, легирующего элемента и десульфуратора. В связи с этим марганец при производстве стали используется в количестве, более чем любой другой металл кроме самого железа. В то же время марганец в России является дефицитным металлом. На территории России имеются марганцевые руды Усинского месторождения (98,5 млн т), железомарганцевые руды Дурновского месторождения (около 300 тыс.т), Селезеньского месторождения с запасами около 5 млн.т, а также Кайгадатское месторождение с запасами 32,7 млн. т. Но в настоящее время месторождения марганцевых руд России не эксплуатируются, так как они представлены карбонатными, окисленными и железомарганцевыми рудами. Эти руды являются, по-сути, комплексными, содержащими железные и марганцевые минералы, а для всех этих руд характерно высокое содержание фосфора. По сложившейся технологии при металлургическом переделе из таких руд невозможно получить стандартные марки марганцевых ферросплавов. Кроме разделения марганца и железа при получении марганцевых сплавов из таких руд проблемой является удаление фосфора. В связи с этим такие железомарганцевые руды не получили промышленного использования, а добываемые попутно с богатыми марганцевыми рудами железомарганцевые руды складываются в отвалах. Для переработки железомарганцевых руд требуются новые теоретические и технологические разработки. Дефосфорацию марганцевой руды обычно проводят методами гидрометаллургии, либо пирометаллургическим обжигом с добавлением различных дефосфоризаторов, увеличивающих стоимость рудподготовки.

По этим причинам для производства стандартных марганцевых сплавов в России марганцевые руды хорошего качества приходится импортировать из ближнего и дальнего зарубежья (ЮАР, Украина, Казахстан, Австралия и др.). При этом на транспортировку зарубежного сырья морским и железнодорожным транспортом приходится значительные затраты. Особую актуальность в решении проблемы получения марганцевых сплавов имеет вовлечение в производство некондиционной высокофосфористой железомарганцевой руды. В этой связи весьма актуальной становится задача изучения особенностей восстановления при одинаковых условиях марганцевых руд разного генезиса, отличающихся содержанием оксидов марганца, железа и фосфора, разными восстановителями. Как известно, использование в качестве восстановителя газов является актуальной задачей еще и в связи с мировым трендом на отказ от углеродных технологий.

Степень разработанности темы исследования:

Вопрос, связанный с переработки некондиционных железомарганцевых руд, высокофосфористых марганцевых руд решается на протяжении многих лет. Следует подчеркнуть, что положительные результаты были достигнуты

благодаря созданию комплексных творческих коллективов из специалистов Украины, Грузии и России, которые работали в тесном содружестве. Для теоретические и практические разработки марганецсодержащих руд огромный вклад внесли: Хитрик С.О., Чуфаров Г.И., Гасик М.И., Кучер А.Г., Деханов Н.М., Цылев Л.М., Куликов И.С., Вегман Е.Ф., также многолетние работы в этом направлении выполнены специалистами института Механообрчермет: Губина Г.В., Бережного Н.Н., Арсентьева В.А., Петрова А.В., Коряковой О.Ф., также ученые, сотрудники других вузов и предприятий: Чернышев А.М., Сорокин К.Г., Дашевский В.Я., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Жучков В.И. и др., большинство работ проведено коллективами, в состав которых входят вышеперечисленные исследователи.

Цель работы. Исследование условий получения низкофосфористых высокомарганцевых шлаков из некондиционных железомарганцевых руд с высоким содержанием фосфора и определение основных технологических параметров переработки таких руд.

Задачи работы:

1. Исследование состава и анализ исходных физико-химических характеристик опытных образцов марганцевых руд разного генезиса.
2. Термодинамическое моделирование процессов в многокомпонентной системе, включающей элементы марганцевых руд и используемых восстановителей.
3. Экспериментальные исследования фазовые и химические преобразований в рудах при восстановительном обжиге.
4. Разработка режимов восстановительного обжига, количества и типа восстановителя, обеспечивающих для одновременного восстановления железа и фосфора, но при сохранении марганца в оксидной фазе.
5. Сравнить особенностей восстановления железа и фосфора в марганцевых рудах разного генезиса при получении марганецсодержащего шлака.
6. Разделения продуктов твердофазного восстановления с получением фосфорсодержащего металлического железа и малофосфористого высокомарганцевого шлака.

Научная новизна работы:

В лабораторных условиях получены и проанализированы данные о физико-химических процессах, протекающих при переработке некондиционных железомарганцевых руд, а именно:

1. Методом термодинамического анализа установлено, в интервале температуры 677-1027°C железо восстанавливается до металлического состояния и твердым углеродом и монооксидом углерода, а марганец – только до оксида MnO. При температуре меньше 877°C фосфор не восстанавливается при любом количестве углерода. Если в системе избыток углерода, то весь фосфор переходит в металл при температуре 927°C в виде соединения Fe₃P.
2. Экспериментально подтверждено, что в легкоплавких железомарганцевых рудах можно производить твердофазное селективное восстановление железа и фосфора монооксидом углерода при температуре

порядка 900°C, сохраняя марганец в оксидной фазе. Повышение температуры и увеличение продолжительности восстановительного обжига в атмосфере CO способствуют более полному переходу фосфора из оксидной фазы в металлическую. Использование в качестве восстановителя при этих же условиях твердого углерода приводит к переходу в металлическую часть не только железа и фосфора, но и значительного количества марганца.

3. Выявлены условия жидкофазного разделения железомарганцевых руд после твердофазного восстановления монооксидом углерода или водородом при температуре 1650...1700°C. Полученные результаты позволяют рекомендовать технологическую схему получения низкофосфористого марганцевого шлака и легированного фосфором железа из железомарганцевых руд и концентратов.

Практическая значимость:

1. Впервые в одинаковых условиях изучены и оценены особенности восстановления элементов железа и фосфора в марганцеворудном сырье разного типа.

2. Экспериментально показана возможность сохранения марганца в оксидной фазе при совместном восстановлении железа и фосфора в легкоплавких железомарганцевых рудах газообразными восстановителями – монооксидом углерода или водородом при температуре 900...1000°C.

3. Установлена возможность жидкофазного разделения продуктов металлизации железомарганцевых руд и концентратов с получением фосфорсодержащего металлического железа и высокомарганцевого шлака при температуре 1650...1700°C без восстановления марганца до металлического состояния.

4. Предложена технологическая схема и набор технологического оборудования для ресурсосберегающей пирометаллургической технологии переработки некондиционных железомарганцевых руд и концентратов по двухстадийной схеме переработки мелкой (0...1 мм) железомарганцевой руды путем предварительного газового восстановления железа и фосфора в многоподовой печи монооксидом углерода или водородом с последующим переплавом восстановленного полупродукта в дуговой печи. По результатам работы подана заявка на патент РФ.

Теоретическая значимость работы:

Выполнен термодинамический анализ химических превращений при твердофазной металлизации некондиционных железомарганцевых руд. Выявлены, условия и последовательность изменений количества и состава продуктов восстановления в зависимости от количества восстановителя. Экспериментально изучена последовательность химических превращений при твердофазной металлизации железомарганцевых руд. Определены начальный и конечный фазовый состав продуктов твердофазного восстановления железа и фосфора из исследуемых руд. Определены условия совместного твердофазного восстановления железа и фосфора, при которых марганец до металлического состояния не восстанавливается. Выявлены условия жидкофазного разделения шлаковой и металлической фаз

железомарганцевых руд после твердофазного восстановления, при которых марганец остаётся в оксидной фазе.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы исследования.

Исходные образцы и продуктов восстановления заливали эпоксидной смолой, выдерживали около 10 минут вакуумной камере (установка Struers citovac для обеспечения вакуума) с целью удаление воздуха в порах и трещинах. Полученные образцы шлифовали в установке Struers tegrapol-15 и (аншлиф) исследовали на оптическом микроскопе в отраженном свете. Микрорентгеноспектральный анализ образцов проводили с помощью электронного микроскопа JSM-6460LV, оборудованного волновым и энергодисперсионным анализаторами; рентгеноструктурный фазовый анализ образцов на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV. Обработку результатов производили с использованием программного обеспечения «Match». Количественную оценку фазового состава производили с помощью приложения Rietveld Refinement.

Термодинамический расчёт условий твердофазного восстановления проведен с помощью программы TERRA с дополненной базой термодинамических данных. Для исследования преобразований в руде при нагреве использованы: метод дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) на установке STA 409 PC/PG Luxx; муфельная печь с непрерывным измерением массы в процессе нагрева и выдержки. Эксперименты проводили в герметизированной печи сопротивления с графитовым нагревателем (печь Таммана). Температуру внутри печи измеряли с помощью вольфрам-рениевой термопарой BP5/20.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты термодинамического моделирования процесса твердофазного восстановления из железомарганцевых руд железа и фосфора при сохранении марганца в оксидной фазе.
2. Результаты экспериментального исследования одновременного восстановления железа и фосфора в марганцеворудном сырье различных месторождений, отличающемся химическим составом.
3. Результаты исследования исходных материалов и образцов, полученных в результате восстановительного обжига.
4. Практические рекомендации по получению низкофосфористого марганецсодержащего шлака из высокофосфористых железомарганцевых руд и концентратов.

Степень достоверности результатов. Достоверность термодинамических и теоретических расчетов обеспечена использованием надежных справочных данных и современного программного обеспечения, соответствием сделанных на основе этих расчетов выводов и рекомендаций экспериментальным результатам. Достоверность экспериментальных результатов обусловлена применением современного оборудования при проведении высокотемпературных экспериментов; применением широко распространенных, разнообразных и апробированных методов исследования;

высоким качеством и точностью исследовательского оборудования, применяемого при анализе экспериментальных результатов; соответствием полученных результатов данным других исследований.

Апробация работы и использование результатов. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 – в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus, 4 статьи в других журналах и сборниках научных трудов. Подана заявка на получение патента на изобретение РФ.

Результаты исследования доложены лично автором на российских и международных конференциях: «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Первоуральск, 2019 г.); «Материаловедение и металлургические технологии» (Челябинск, 2020 г., 2021 г.); «Промышленное производство и металлургия». Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ и АО «ЕВРАЗ НТМК» (Нижний Тагил, 2020 г., 2021 г.); 12-й и 13-й научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2020 г., 2021 г.); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021 г.); международный форум «Диалог металлургов: прогноз развития отрасли до 2030 года. Ценовые и технологические решения» (Москва 2022 г.); XVII Международный Конгресс сталеплавильщиков и производителей металла "От руды до стали" ISCON – 2023. (Магнитогорск, 2023 г.). 2-я Международная Конференция: «Качество стали 2024 – от руды до проката» (High Grade Steel – 2024). (Москва, 2024 г.).

Личный вклад автора. Анализ литературного материала, постановка задачи и выполнение экспериментальных исследований по твердофазному совместному восстановлению железа и фосфора из оксидов марганцевых руд разного генезиса. Исследование состава образующихся в процессе восстановления металлических и неметаллических фаз, выявление особенностей восстановления элементов марганцевых руд в одинаковых условиях, обобщение результатов экспериментов, обсуждение полученных результатов совместно с научным руководителем, непосредственное участие в подготовке публикаций.

Связь диссертации с планами НИР. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований №FENU-2023-0011 (2023011ГЗ)) и в рамках научного проекта РФФИ № 20-38-90112.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов. Диссертация изложена на 107 страницах, содержит 37 рисунка, 21 таблиц и список литературы из 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности проблемы, показана научная новизна, практическая

ценность и достоверность результатов исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ марганцевой минерально-сырьевой базы на основе литературных источников. Показано многообразие разновидностей марганцевых руд, а также особенностей их вещественного состава. Широкий диапазон изменения содержания марганца от 10 до 40% и железа от 10 до 30%, а также высокое содержание фосфора обуславливают необходимость индивидуального технологического подхода к марганцевым рудам разного генезиса.

Для производства марганцевых ферросплавов проводятся исследования новых видов сырья. К сожалению, оценки марганцевых руд проводятся не всегда комплексно, во многих случаях лишь по химическому составу сырья и редко с учетом его физико-химических характеристик. Кроме того, в литературе отсутствует сравнение особенностей восстановления компонентов марганцевых руд разного генезиса восстановителями разного типа при одинаковых условиях восстановления. Основным препятствием, связанным с переработкой марганцевых руд, является высокое содержание в них железа и фосфора, что не позволяет получать продукт нужного состава (высокомарганцевый концентрат). Существующие технологии обогащения марганцевых руд включает гравитационную сепарацию, магнитную сепарацию и флотацию, которые не изменяют химических свойств или характеристик минералов руды, в результате чего извлечение марганца не превышает 80%. Обычно после такого обогащения железо и фосфор остаются в товарной марганцевой руде. Наиболее перспективным способом является карботермическое восстановление.

Вторая глава посвящена исследованию минералого-структурные особенности марганцевых руд. Приведены результаты термодинамического моделирования процессов в многокомпонентной системе, включающей элементы марганцевых руд и используемых восстановителей.

В процессе планирования исследований считали целесообразным изучить марганцевые руды разного генезиса, включая богатые по марганцу руды, комплексные железомарганцевые руды и концентраты.

Для решения этой задачи в качестве исходного материала были отобраны марганцевые руды различных типов: железомарганцевая руда Селезеньского месторождения (Кузбасс, Россия), характеризующаяся относительно высоким содержанием железа и фосфора, концентрат Жайремского ГОКа (Казахстан) с высоким содержанием железа, природная богатая бразильская руда. Руды отличаются не только содержанием марганца, железа и составом пустой породы, но также происхождением, минеральной структурой и содержанием вредных примесей. Эти руды частично используются в настоящее время на отечественных ферросплавных предприятиях.

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа в исходных образцах во всех трёх рудах в значительном количестве присутствуют Fe, Mn и Si, которые образуют преимущественно собственные оксидные фазы.

Богатая марганцем бразильская руда отличается от жайремского концентрата и селезеньской руды заметно меньшим количеством кремнийсодержащих частиц, а также более высоким содержанием алюминия и магния (рисунок 1).

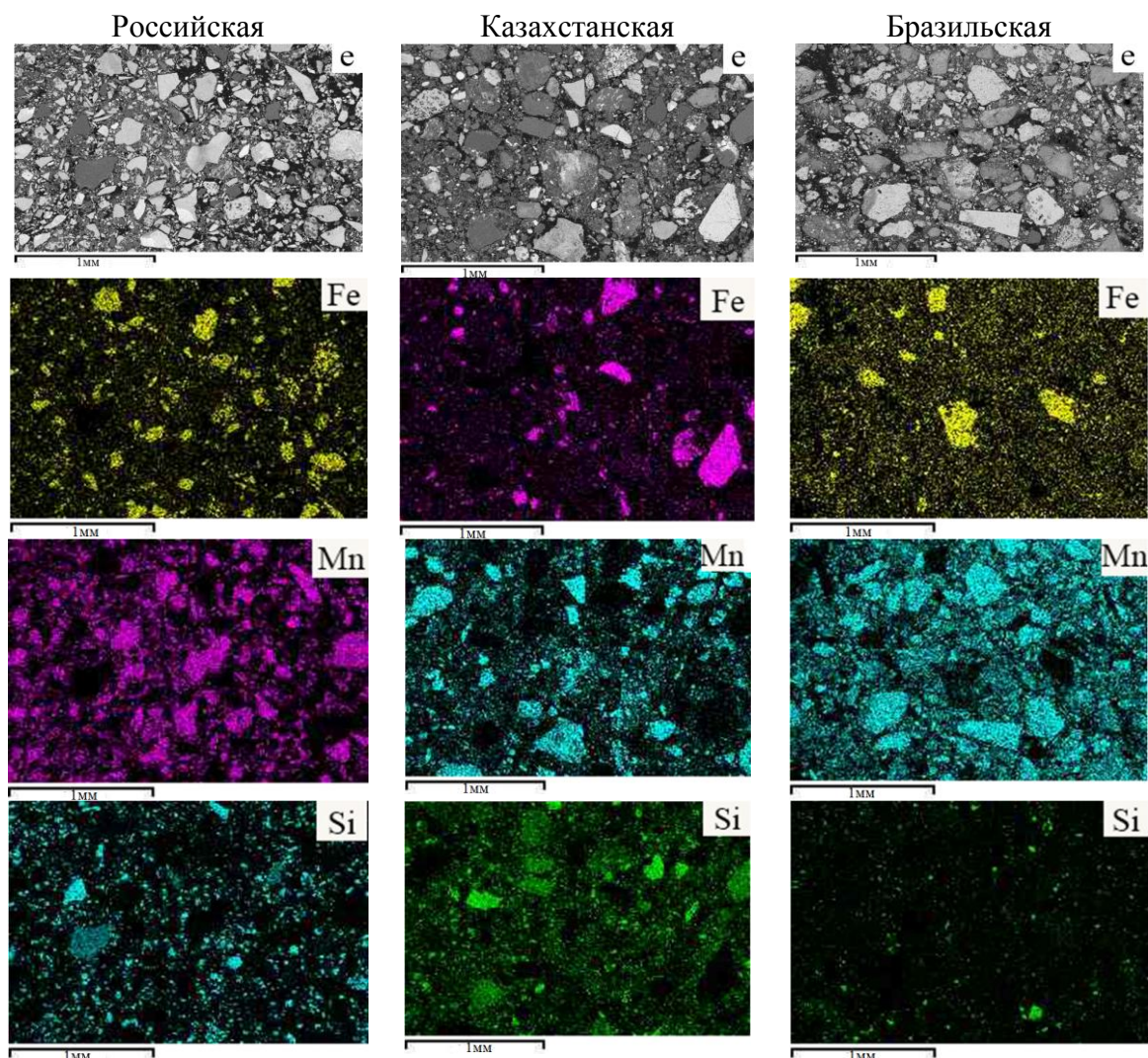


Рисунок 1 – Распределение основных элементов в рудных материалах.

Согласно результатам рентгенофазного анализа (рисунок 2) в селезеньской руде присутствуют оксиды марганца, кремния, а также карбонаты и гидраты железа, карбонаты кальция, что соответствует составу руды пиролюзит-псиломеланового типа. Фосфор в исходной руде сосредоточен в минерале $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ и $\text{Fe}_4\text{H}_3\text{P}_3\text{O}_{15}$. Интенсивность пиков других фаз на рентгенограммах оказалась относительно низкой, что не позволило с достаточной точностью определить фазы, содержащие элементы К, Al и Ba. В концентрате из Жайремского ГОКа наряду с оксидом марганца MnO_2 в значительном количестве присутствуют кварцит SiO_2 , гематит Fe_2O_3 и карбонат кальция CaCO_3 . В исходном образце бразильской руды преобладающей фазой является оксид марганца пиролюзит MnO_2 , в заметном количестве присутствуют магнетит Fe_3O_4 и кварцит SiO_2 . Марганец во всех образцах находится в максимально окисленном состоянии – в виде диоксида марганца MnO_2 .

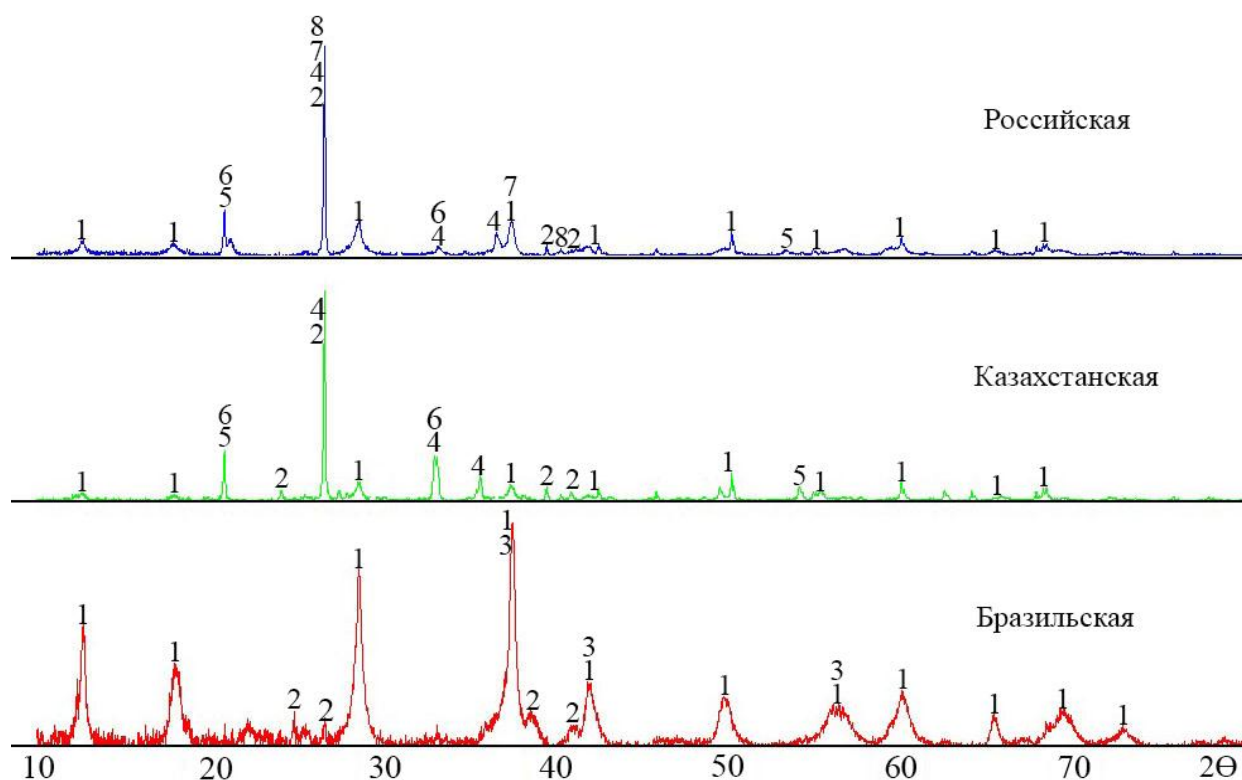


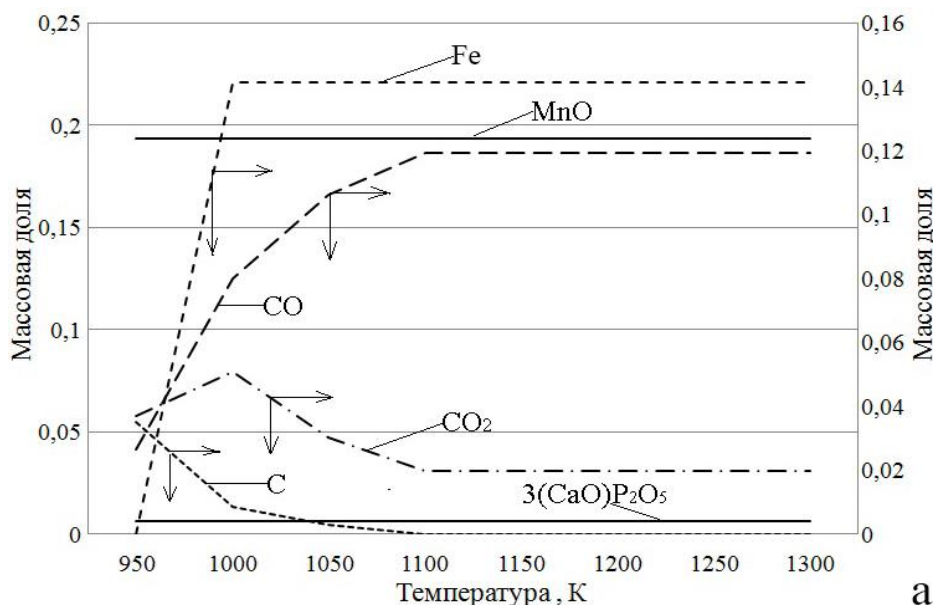
Рисунок 2 – Рентгенограммы исходных руд. Фазы: 1– MnO_2 , 2– SiO_2 , 3– Fe_3O_4 , 4– Fe_2O_3 , 5 – $CaCO_3$, 6 – $FeCO_3$, 7 – $Ca(PO_3)_2$, 8– $Fe_4H_3P_3O_{15}$.

Результаты термодинамического моделирования. Для описания процессов, протекающих при твердофазной металлизации в комплексных железомарганцевых рудах, выполнен термодинамический анализ с использованием программного комплекса «TERRA». Анализ позволил определить состав компонентов системы, выделить реакции, ответственные за образование наиболее представительных компонентов и фаз системы, определить характеристики и температурную последовательность химических и фазовых превращений в конденсированных средах, прогнозировать образование фаз и компонентов.

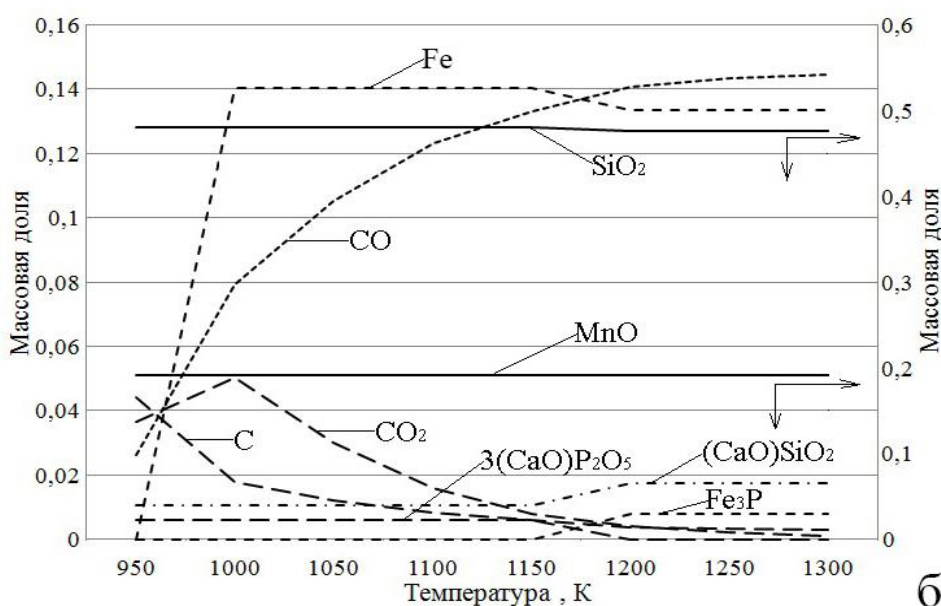
Методика расчетов равновесных состояний состоит в следующем. После ввода состава смеси (руда и восстановитель) и двух термодинамических параметров (T и P), соответствующих конечному равновесному состоянию, программа из имеющихся в исходном состоянии химических элементов комбинирует все возможные простые и сложные соединения, для которых есть термодинамические характеристики в базе данных. Далее программа методом итерационных расчетов определяет те вещества и их количества, сумма энтропий которых обеспечивает максимальное значение энтропии всей системы при заданных термодинамических условиях. Вычисленный подобным образом состав системы считается равновесным.

Оптимальную концентрацию восстановителя в шихте выбирали на основании результатов серии предварительных вычислений с различным содержанием восстановителя и при разных температурах.

На рисунке 3,а представлены результаты расчёта состава системы при нагреве смеси руды с твёрдым углеродом (6 г на 100 г руды) при недостатке углерода для восстановления фосфора, но в количестве, достаточном для полного восстановления железа. Согласно результатам термодинамических расчетов в этом случае в системе существуют следующие вещества: Fe, MnO, $3(\text{CaO})\cdot\text{P}_2\text{O}_5$, C, CO, CO_2 , Al_2O_3 , $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, SiO_2 . Но соединения Al_2O_3 , $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, SiO_2 на этом графике не показаны, так при условиях, для которых произведён расчёт, их количество практически не изменяется. Как следует из данных, приведённых на рисунке 3,а, при этих условиях всё железо должно находиться в металлической фазе, а весь марганец в виде MnO и весь фосфор в виде соединения $3(\text{CaO})\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ – в составе оксидной фазы.



а



б

Рисунок 3 – Состав системы с недостатком (а) и избытком (б) углерода для восстановления фосфора.

На рисунке 3, б представлены результаты расчёта состава системы при массе углерода 7 г на 100 г руды. Согласно результатам расчетов в системе такого состава при таких значениях температуры существуют следующие соединения: Fe, Fe₃P, Al₂O₃, MgO·SiO₂, SiO₂, MnO, 3(CaO)·P₂O₅, CaO·SiO₂, C, CO, CO₂. Температура начала восстановления фосфора при таком количестве углерода составляет 1150К. При температуре 1150К в системе появляется фосфид железа, а при нагреве до 1200К весь фосфор переходит в металл в виде соединения Fe₃P.

Согласно результатам термодинамического моделирования в интервале температур 950–1300К железо при наличии достаточного количества углерода будет в металлическом состоянии. Однако с точки зрения эффективности реального процесса необходимо проводить твердофазную металлизацию при более высокой температуре. Фосфор в зависимости от количества углерода и от температуры может быть в виде Fe₃P в металлической фазе или в виде 3(CaO)·P₂O₅ в оксидной.

Третья глава посвящена твердофазному совместному восстановлению железа и фосфора из оксидов марганцевых руд твердым углеродом или газообразным СО.

Эксперименты по одновременному восстановлению железа и фосфора в образцах каждой из 3-х руд монооксидом углерода или твёрдым углеродом проводили при температуре 900 °С и 1000 °С и продолжительности восстановления 90, 180 и 300 минут в герметизированной печи сопротивления (печи Таммана) с графитовым нагревателем (рисунок 4).

Для этого в рабочее пространство печи одновременно помещали шесть корундовых тиглей. В три тигля засыпали смесь в виде порошков каждой из 3-х марганцевых руд и восстановитель твердый углерод размером фракций – 1 мм. В качестве восстановителя использовали порошок размолотого боя графитированных электродов. В другие три тигля помещали такие же порошки разных марганцевых руд, но без графита. Печь закрывали крышкой для создания восстановительной атмосферы, нагревали до температуры 900°С или 1000°С и выдерживали в течение 90, 180 или 300 минут.

Полученные образцы продуктов восстановления после охлаждения заливали эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали с помощью оптического и электронного микроскопа. Химический состав фаз определяли микрорентгеноспектральным методом с помощью микроскопа JSM–6460LV фирмы JEOL.

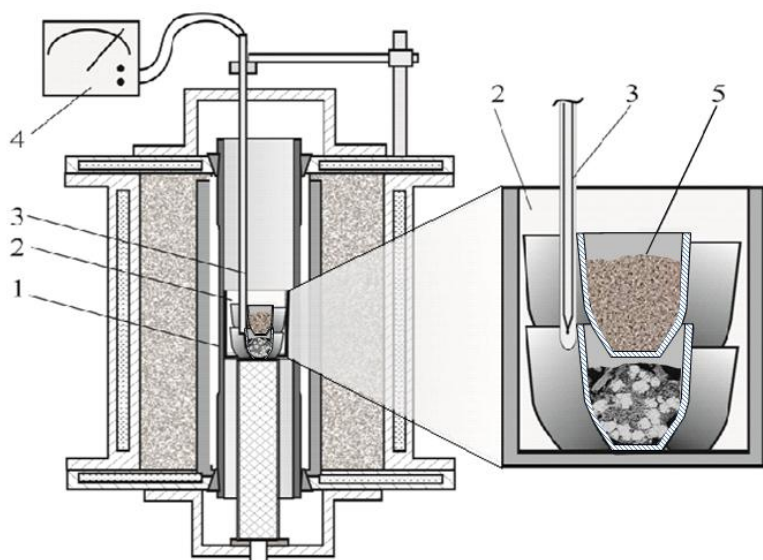


Рисунок 4 – Схема

эксперимента:

- 1 – графитовый нагреватель,
- 2 – контейнер с тиглями,
- 3 – термопара,
- 4 – потенциометр,
- 5 – порошки реакционных материалов

Результаты восстановительного нагрева образцов при 900°C и выдержкой 90 минут в контакте с графитом или только в восстановительной атмосфере CO в общем аналогичны. Различие заключается лишь в том, что в контакте с твердым углеродом преобразования в рудных образцах носят более глубокий характер. После восстановительного обжига на поверхности и внутри руды обнаруживаются выделения металлической фазы, содержащие железо. Остаточная оксидная фаза состоит из оксидов марганца и фосфора, а также нерудных минералов. Следует также отметить, что при таких условиях выделения металлических фаз наблюдаются только в железомарганцевых рудах, а в бразильской руде в атмосфере CO выделения металлических частиц не происходит, железо восстанавливается только твердым углеродом и лишь в силикатной фазе (рисунок 5, таблица 1).

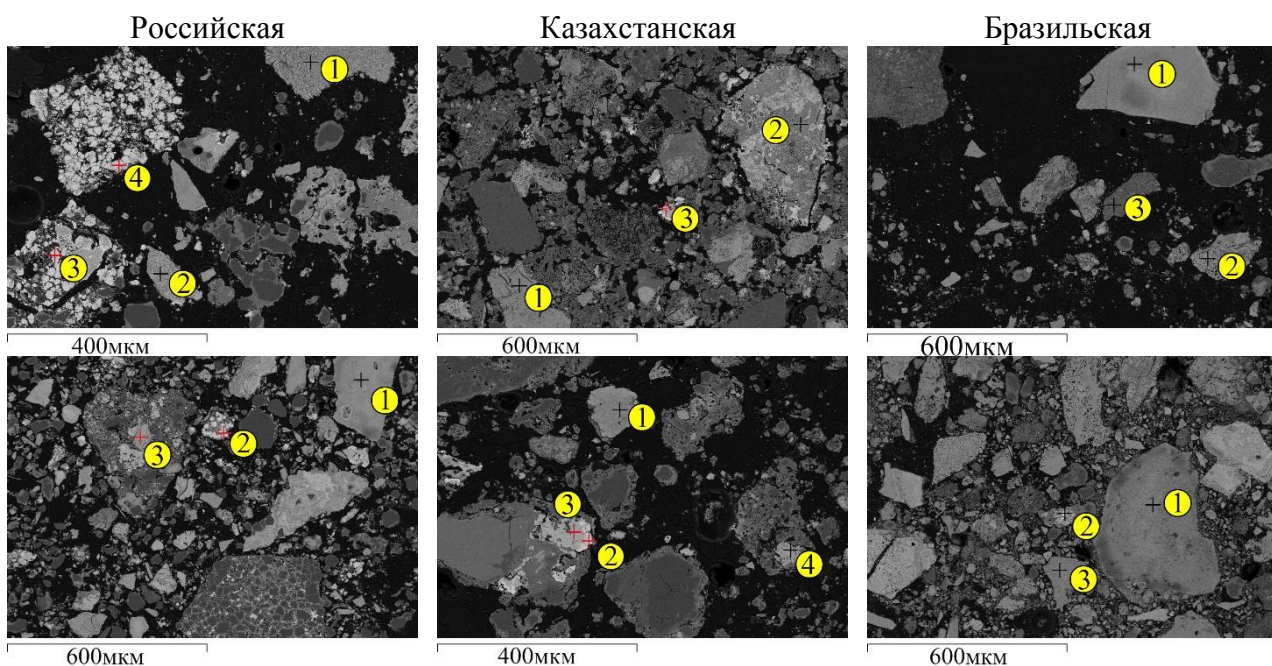


Рисунок 5 – Вид частиц руды после обжига при температуре 900°C и продолжительности выдержки 90 мин. в атмосфере CO (верхний ряд) и в смеси с твердым углеродом (нижний ряд).

При повышении температуры до 1000°С и увеличении продолжительности выдержки образцов до 180 минут в комплексной железомарганцевой руде и концентрате в атмосфере СО восстанавливается не только железо, но и фосфор, а в железомарганцевой руде – частично ещё и марганец до 2 ат%. С повышением температуры и увеличением продолжительности выдержки образцов в атмосфере СО содержание фосфора в металлической фазе увеличивается. Результатом восстановления твердым углеродом является образование раствора в металлическом железе не только фосфора, но и марганца. В оксидной фазе бразильской руды после обжига обнаруживается индивидуальный монооксид марганца, а также марганец в составе силикатной фазы (рисунок 6, таблица 2).

Таблица 1 – Содержание элементов после восстановления при температуре 900°С и выдержке 90 минут, ат.%

Руда, восстановитель	Точка анализа	O	Al	Si	P	Mn	Fe	Cu	Ba
Железомарганцевая, СО	1	51,4	0,0	0,0	0,2	48,4	0,0	0,0	0,0
	2	53,9	0,0	0,0	0,1	46	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	98,9	1	0,0
	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,8	0,6	0,0
Железомарганцевая, углерод	1	57,2	2,8	0,0	0,0	39	0,0	0,0	1
	2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	98,9	1	0,0
	3	57,6	0,0	0,0	0,0	31,6	10,5	0,0	0,4
Концентрат, СО	1	53,6	0,0	2,2	0,0	44,2	0,0	0,0	0,0
	2	30,7	0,0	0,0	0,0	68	0,0	0,0	1,2
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,6	0,4	0,0
Концентрат, углерод	1	53,6	0,0	0,0	0,0	46,4	0,0	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	96,8	0,0	0,0
	4	57,9	0,0	0,0	0,0	38,2	4	0,0	0,0
Бразильская, СО	1	52,5	1,7	0,0	0,0	45,8	0,0	0,0	0,0
	2	58,4	3	0,0	0,0	37,4	1,2	0,0	0,0
	3	52,2	17,9	1,9	0,0	25,1	2,6	0,0	0,0
Бразильская, углерод	1	55,5	5,2	0,0	0,0	36,7	2,6	0,0	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,7	1,3	0,0
	3	55,4	4	0,0	0,0	38,7	2	0,0	0,0

После нагрева образцов до 1000°С с увеличением продолжительности изотермической выдержки до 300 минут в атмосфере СО и в смеси с твердым углеродом наблюдается восстановление железа и фосфора и преобразование высших оксидов марганца в монооксид. Состав фаз в образцах, обожжённых при температуре 1000°С с изотермической выдержкой 300 минут, аналогичен фазам, полученным при температуре 1000°С и выдержке 180 минут.

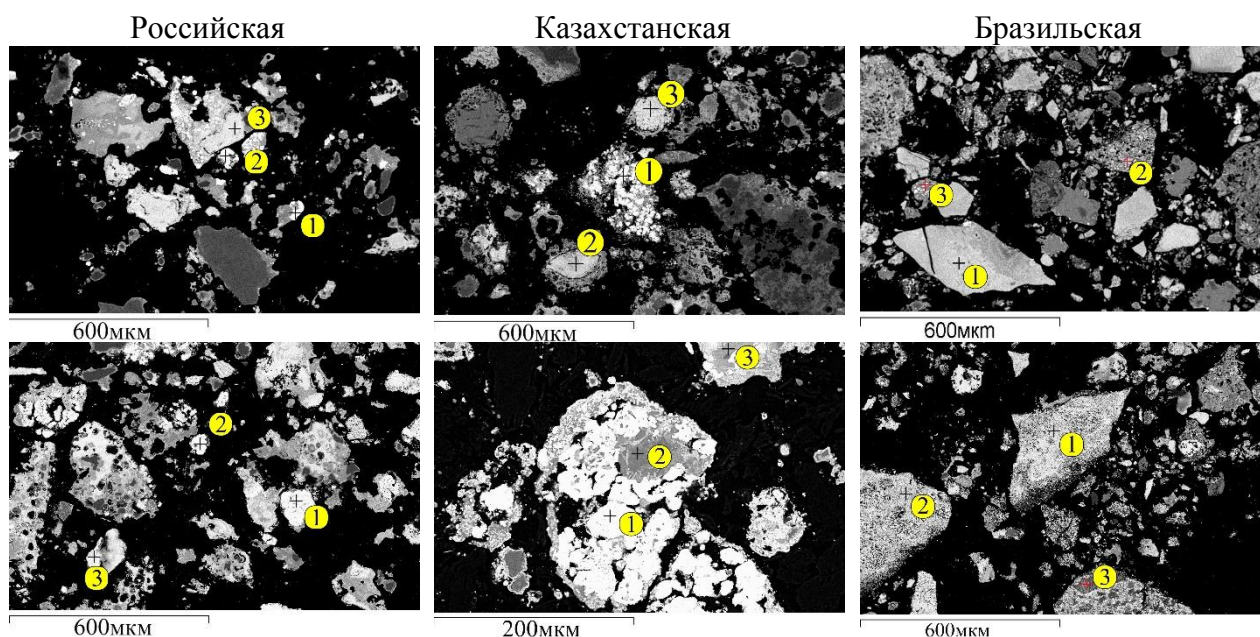


Рисунок 6 – Вид частиц руды после обжига при температуре 1000°C и продолжительности выдержки 180 мин. в атмосфере CO (верхний ряд) и в смеси с твердым углеродом (нижний ряд).

Таблица 2 – Содержание элементов после восстановления при температуре 1000°C и выдержке 180 минут, ат.%

Руда, восстановитель	Точка анализа	O	Na	Al	Si	P	K	Mn	Fe	Cu	Ba
Железомарганцевая, CO	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	98,8	0,5	0,0
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	2	97	0,2	0,0
	3	59,2	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	37,5	1,2	0,0	0,7
Железомарганцевая, углерод	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	8,7	90,3	0,7	0,0
	2	60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,3	1,2	0,0	1,5
	3	59,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37	2,3	0,0	0,7
Концентрат, CO	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	99,9	0,0	0,0
	2	62,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,6	3,3	0,0	0,0
	3	61,7	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	24,4	8,7	0,0	0,0
Концентрат, углерод	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	99,8	0,0	0,0
	2	67	1,8	6,4	20,2	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	68,8	1,7	2,3	22,2	0,0	1,7	2,6	0,0	0,0	0,7
Бразильская, CO	1	59,6	0,0	4	0,4	0,5	0,0	32,8	2,7	0,0	0,0
	2	55,1	0,0	4,5	3,1	0,0	0,0	26,1	11,3	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	3	95,2	1,4	0,0
Бразильская, углерод	1	60,9	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0
	2	59,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,3	1,2	0,0	0,0
	3	61	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	18,2	17,6	0,0	0,0

Таким образом, результаты твердофазного восстановления показали, что при относительно низкой температуре (ниже температуры плавления оксидной фазы марганцевых руд) можно производить твердофазное восстановление железа. После восстановительного обжига при температуре 900°C и выдержке 90 минут в рудах обнаруживаются выделения металлического железа. При этом восстановление монооксидом углерода CO

приводит к переходу в металлическую фазу только железа и только в железомарганцевых рудах. В богатой марганцевой руде монооксид в отличие от твёрдого углерода не восстанавливает даже железа.

Повышение температуры до 1000°C приводит к восстановлению монооксидом углерода не только железа, но и фосфора. Увеличение продолжительности выдержки до 180...300 минут в восстановительной атмосфере ведёт к повышению содержания фосфора в металлической фазе. В то же время в контакте с твердым углеродом при этой температуре в металлическую часть переходят не только железо и фосфор, но и частично марганец, причём с увеличением продолжительности выдержки количество восстановленного марганца увеличивается. В связи с этим использование при твёрдофазном восстановлении в качестве восстановителя монооксида углерода является более эффективным в сравнении с твердым углеродом, поскольку это способствует сохранению марганца в оксидной фазе. При этом в оксидной фазе после восстановительного обжига во всех образцах обнаруживается индивидуальный монооксид марганца, а также марганец в составе силикатной фазы.

Полученные результаты позволяют также характеризовать бразильскую марганцевую руду, отличающуюся более высоким содержанием оксидов марганца, как трудно восстанавливаемую.

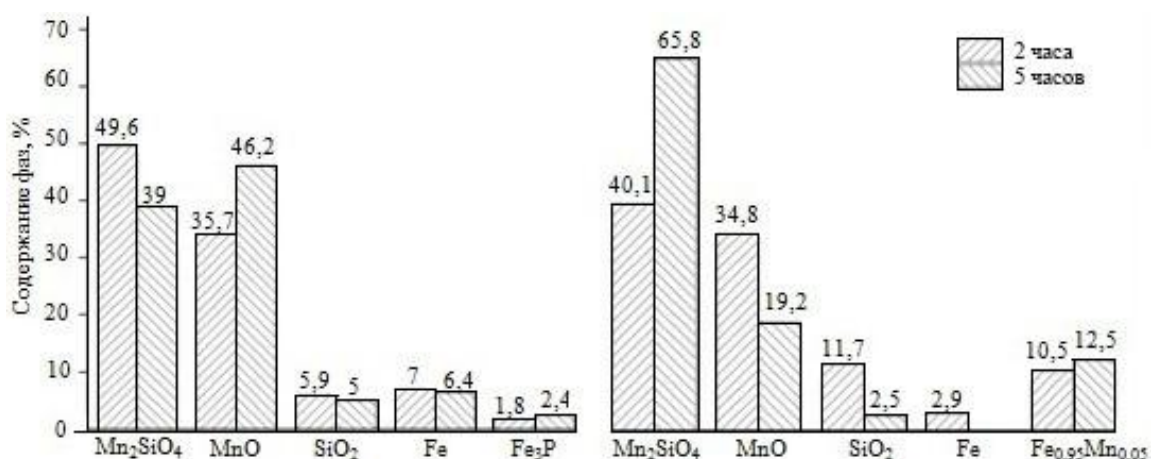


Рисунок 7 – Содержание фаз после восстановительного обжига при температуре 1000°C газообразным СО (а) или твердым углеродом (б).

На рисунке 7 представлены результаты количественного определения фаз, содержащихся в железомарганцевой руде после восстановительного обжига при температуре 1000°C. После восстановительного обжига в атмосфере СО с увеличением продолжительности выдержки содержание Mn₂SiO₄ уменьшается, а содержание MnO увеличивается. В результате увеличения количества восстановленного фосфора растет количество Fe₃P, а содержание железа уменьшается (рисунок 7,а).

После восстановительного обжига в смеси с твердым углеродом при этих же условиях увеличение продолжительности выдержки приводит к росту количества фазы Mn₂SiO₄, а количество фаз MnO и SiO₂ соответственно уменьшаются. Образование тефроита Mn₂SiO₄, по-видимому,

затрудняет также восстановление марганца, поскольку при этом уменьшается количество металлического сплава $Fe_{0.95}Mn_{0.05}$ (рисунок 7,б).

Такой характер распределения железа и марганца между фазами подтверждается и картами распределения этих элементов в компонентах продуктов твёрдофазного восстановления (рисунок 8). Видно, что и при восстановлении в атмосфере CO и при контакте с углеродом практически всё железо находится в металлической фазе, а марганец сосредоточен вне металлических частиц. Но после восстановления твёрдым углеродом на картах выявляется присутствие марганца и в некоторых металлических частицах. Распределение фосфора на картах выглядит равномерным и не выявляет каких-либо характерных особенностей, что, по-видимому, обусловлено его малой концентрацией.

Попытка измельчения и магнитной сепарации продуктов обжига оказалось неэффективной, поскольку вместе с восстановленным металлом магнитным полем извлекается и большое количество оксида марганца. Разделить смесь металлических и оксидных фаз по-видимому можно лишь плавлением. Для этого необходимо определить рациональные условия пирометаллургического разделения продуктов твёрдофазного восстановления железомарганцевых руд и концентратов.

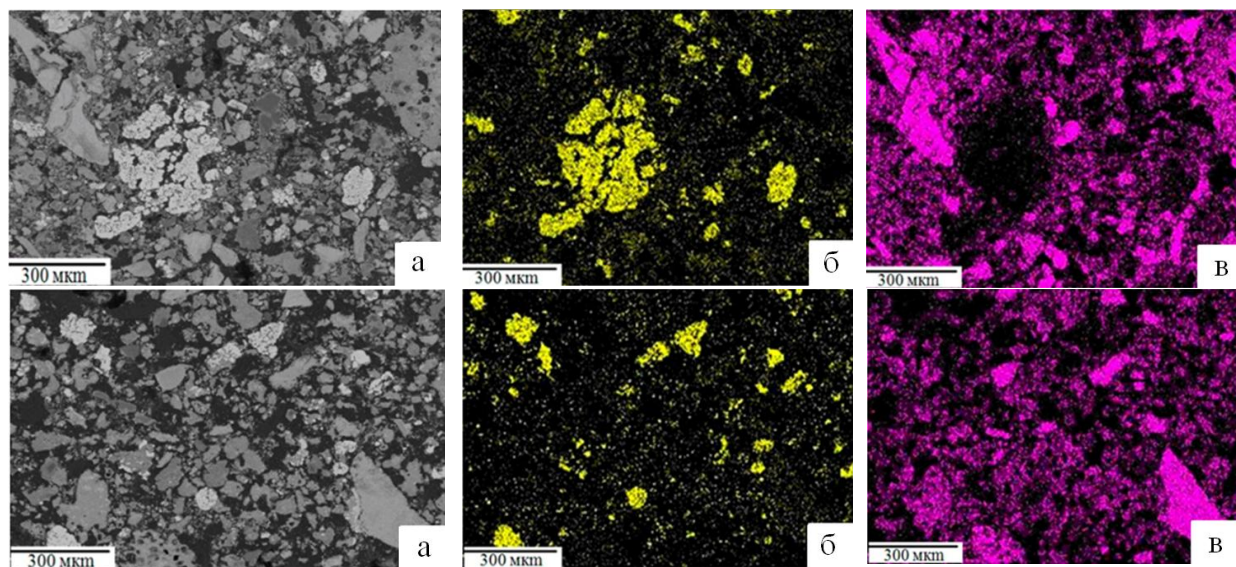


Рисунок 8 – Карта распределения элементов после восстановления в атмосфере CO (вверху) и в контакте с твёрдым углеродом (внизу) при 1000°C в течении 300 мин.
а - электронное изображение; б и в - распределение Fe и Mn.

Результаты восстановления железа и фосфора водородом. Эксперименты по восстановлению железа и фосфора рудных материалах водородом провели в реакторе вертикальной печи фирмы «RB Automazione» MM 6000. Процесс восстановления вели в потоке водорода при температуре 800...900°C в течение 20 или 30 минут при расходе водорода 5 л/мин.

Исследования восстановленных образцов показали, что при температуре 800°C и выдержке в течение 20 минут в металлическую часть переходит железо. При этом фосфор в высокофосфористой железомарганцевой руде Селезеньского месторождения обнаруживается и в металлической и в

оксидной фазе. Повышение температуры до 900°C и продолжительности выдержки до 30 минут сопровождается переходом в металлическую часть и железа и фосфора. При этом и при температуре 800°C и температуре 900°C высшие оксиды марганца в рудах восстанавливаются до монооксида марганца и сохраняются в оксидной фазе (рисунок 9, таблица 3).

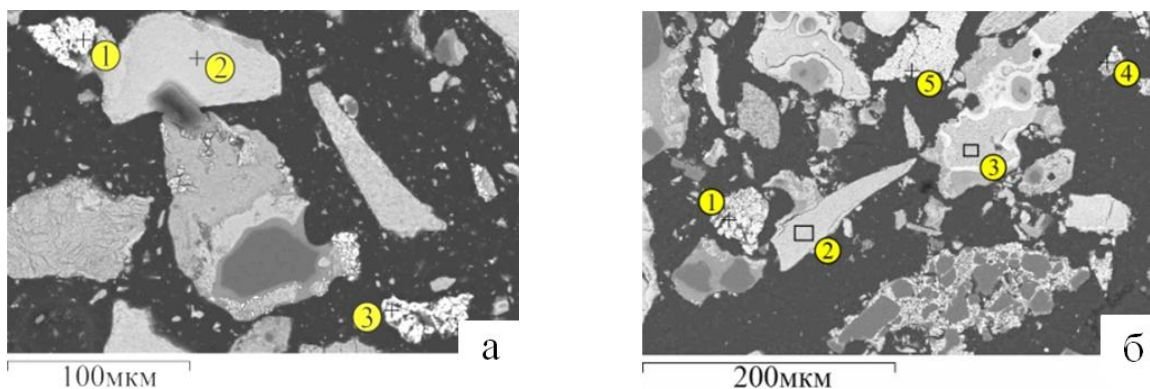


Рисунок 9 – Вид образцов железомарганцевых руд Селезеньского месторождения после восстановительного обжига в атмосфере водорода при температуре 800°C и выдержке 20 мин. (а); при 900°C и выдержке 30 мин. (б).

Таблица 3 – Содержание элементов (ат. %) в точках анализа продуктов восстановления при температуре 800°C или 900°C

Точки	O	Si	P	Ca	Mn	Fe	Ba
1а	0,0	0,0	0,1	0,0	1,3	98,7	0,0
2а	59,6	2,9	0,1	0,0	35	1,3	1,2
3а	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	98,9	0,0
1б	0,0	0,0	1,0	0,0	0,6	98,4	0,0
2б	55,5	5,0	0,0	0,7	36,5	1,0	1,3
3б	56,3	0,0	0,0	0,2	42,9	0,0	0,6
4б	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	98,9	0,0
5б	0,0	0,0	0,9	0,0	0,5	98,6	0,0

Четвертая глава посвящена исследованию жидкофазного разделения продуктов твердофазного восстановления и технологической схеме получения низкофосфористых высокомарганцевых шлаков.

Для жидкофазного разделения использовали продукты твердофазного восстановления железомарганцевых руд Селезеньского месторождения и концентрата Жайремского ГОКа, восстановленных при температуре 1000°C и изотермической выдержке 300 минут в атмосфере СО. Печь нагревали до температуры плавления шихты, загружали образцы в разогретую печь в графитовый или корундовый тигли. Расплав перемешивали, выдерживали 3 минуты и выливали на металлическую плиту. После затвердевания металл легко отделялся от шлака.

Состав металла и шлака после жидкофазного разделения восстановленных концентратов железомарганцевой руды представлен в таблице 4. Из приведенных данных видно, что в процессе разделения продуктов восстановительного обжига руды месторождения Селезень получили шлак с высоким содержанием марганца и металл, легированный фосфором. Но при плавлении в процессе разделения в графитовом тигле

марганец в небольшом количестве (4,5 масс %) дополнительно перешел в металл, несмотря на попытку быстрого плавления.

В результате разделительной плавки по такой же схеме восстановленного концентрата из Жайремского ГОКа, но в корундовом тигле, получили металл и шлак. По результатам спектрального анализа металл содержит 99,5% железа, 0,3% фосфора и 0,2% марганца, а основными оксидами шлака являются оксид марганца и оксид кремния. Полученный низкофосфористый шлак из железомарганцевых руд Селезеньского месторождения отличается от шлака жайремского концентрата заметно меньшим количеством кремния и более высоким содержанием марганца.

Таблица 4 – Состав металла и шлака – продуктов жидкофазного разделения (масс, %)

Руда	Фаза	O	Al	Si	Ca	P	Mn	Fe	Cu
Российская	Шлак	35,6	1,3	9,6	0,4	0,0	51,3	1,8	0,0
	Металл	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	4,5	94,1	0,6
Казахстанская	Шлак	46,9	6,9	15,7	2,4	0,0	25,8	2,3	0,0
	Металл	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	99,5	0,0

Таким образом, в результате жидкофазного разделения продуктов твердофазного восстановления железомарганцевых руд монооксидом углерода получен легированный фосфором металл и высокомарганцевый шлак. Согласно материальному балансу плавки продуктов твердофазного восстановления железомарганцевой руды Селезеньского месторождения сквозной выход металла и шлака составил соответственно 19,6 и 80,4 % от массы шихты. Согласно материальному балансу плавки продуктов твердофазного восстановления концентрата Жайремского ГОКа выход металла и шлака составил соответственно 11,5 и 88,5 % от массы шихты.

На таблице 5 представлены состав элементов, присутствующих в металле и шлаке после разделительной плавки железомарганцевый руды месторождения Селезень, восстановленной водородом при температуре 900°C с выдержкой 30 минут. Из приведённых в таблице данных следует, что после разделения продуктов восстановительного обжига получен шлак с высоким (35%) содержанием марганца и попутный металл (железо), легированный фосфором, кобальтом, медью и никелем с относительно небольшим (0,5%) содержанием марганца.

Таблица 5 - Состав металла и шлака (масс. %) из руды Селезеньского месторождения (Россия) после разделительной плавки

Фаза	O	Si	Al	P	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ba	K
Металл	0,0	0,0	0,0	0,9	0,5	96,2	1,1	0,4	0,9	0,0	0,0
Шлак	37,1	5,7	12,3	0,0	35,3	5,8	0,0	0,0	0,0	2,2	1,1

Таким образом, в результате твердофазной металлизации высокофосфористых железомарганцевых руд и концентратов и последующего быстрого плавления и жидкофазного разделения продуктов

металлизации удалось перевести железо и фосфор в металлическую фазу и почти полностью сохранить марганец в оксидной фазе.

Технологические рекомендации. Результатами экспериментов, изложенными в главе 3, показано, что развитие процессов твёрдофазного восстановления железа и фосфора в железомарганцевой руде становится заметным уже при температуре 900 °С, то есть ниже температуры плавления руды. Температура и длительность выдержки оказывают существенное влияние на процесс восстановления элементов. Восстановление железа и фосфора может происходить как твёрдым углеродом, так и газообразным монооксидом углерода СО. Но поскольку отделить восстановленный металл от оксидной марганецсодержащей части можно только плавлением, а при плавлении продуктов восстановления твёрдым углеродом продолжается восстановительный процесс за счёт растворённого в железе и остаточного твёрдого углерода, то при разделительной плавке происходит восстановление и переход марганца из оксидной части в металлическую. Это приводит к потерям марганца с попутным металлом. Но когда восстановление железа и фосфора осуществляется газообразным восстановителем, то в восстановленном металло-оксидном композите нет остаточного восстановителя, и при разделительной плавке марганец не восстанавливается и полностью сохраняется в шлаковой фазе. Поэтому обожжённые в восстановительной атмосфере СО или в потоке водорода твёрдые продукты восстановления некондиционных железомарганцевых руд могут быть шихтовым материалом, пригодным для получения низкофосфористых высокомарганцевых шлаков.

Для твёрдофазного восстановления железа и фосфора и последующего пирометаллургического разделения полученного продукта с получением фосфористого железа и низкофосфористых марганцевых шлаков можно объединить в один технологический цикл работу восстановительного и плавильного агрегатов. Поскольку использование восстановительных газов исключает восстановление марганца при разделительной плавке, то для совместного восстановления железа и фосфора целесообразно использовать в качестве восстановителя и энергоносителя восстановительный газ, возможно не только монооксид углерода, но, по-видимому, и природный газ, а также продукты его конверсии или даже чистый водород.

В качестве агрегата для металлизации железа и фосфора в железомарганцевой руде можно использовать существующие газовые, в частности, многоподовые печи типа используемых на Саткинском комбинате «Магнезит» печей для «мягкого» обжига магнезита. Использование газовых печей позволит легко отделить продукты твёрдофазного восстановления от восстановителей и исключить дополнительное восстановление марганца на стадии пирометаллургического разделения продуктов восстановления.

Пирометаллургическое разделение можно осуществлять в дуговых печах постоянного тока типа используемых в цехе №4 Актюбинского завода ферросплавов. Важной отличительной особенностью этих печей является отсутствие непосредственного контакта между графитовым электродом и

расплавом шлака, что позволит исключить восстановление и переход в металлическую часть марганца на стадии разделения. Таким образом, по предлагаемой технологической схеме появляется возможность использования отечественных железомарганцевых руд для получения ферромарганца.

На основании полученных нами данных может быть предложена двухстадийная схема переработки мелкой (0...1 мм) железомарганцевой руды – предварительное газовое восстановление с последующим переплавом в дуговой печи постоянного тока при температуре 1650...1700 °С (для получение жидкотекучего шлака и предотвращение потери каратков металла в месте с шлаком), и определены основные технологические параметры получения низкофосфористых высокомарганцевых шлаков из высокофосфористых железомарганцевых руд. Продолжительность восстановительного обжига при температуре 900...1000 °С может составлять до 300 мин, далее плавление продукта твёрдофазного восстановления восстановительными газами в дуговой печи постоянного тока с разделением на фосфорсодержащее железо и низкофосфористый марганцевый шлак.

Предлагаемая общая схема переработки фосфорсодержащих железомарганцевых руд представлена на рисунке 10.

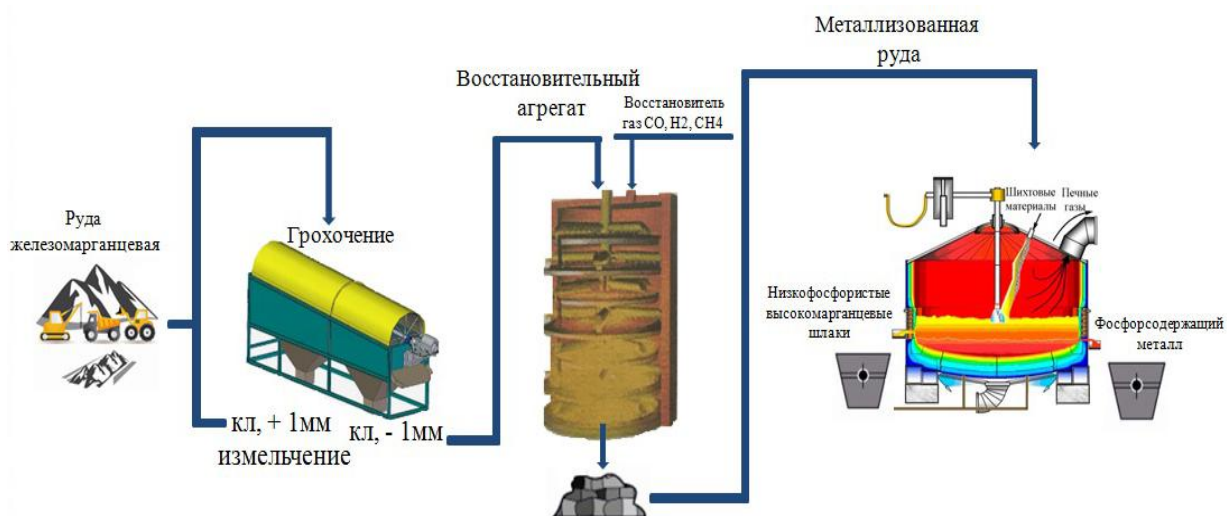


Рисунок 10 – Предлагаемая технологическая схема получения низкофосфористых высокомарганцевых шлаков с использованием неокускованной мелочи железомарганцевых руд.

Предлагаемая схема позволит решить несколько важных задач:

- обеспечить производство низкофосфористых высокомарганцевых шлаков из отечественных некондиционных железомарганцевых руд;
- использовать без предварительного окускования железомарганцевую руду размером 0...1 мм, что сократит энергозатраты на подготовку рудного сырья и приведет к снижению экологической нагрузки;
- заменить дорогостоящие углеродные восстановители (кокс и антрацит) в процессе выплавки низкофосфористых высокомарганцевых шлаков газовыми восстановителями – природным газом и продуктами его конверсии (монооксидом углерода и водородом),

- уменьшить потери марганца с попутным сплавом;
- снизить удельный расход электроэнергии.

Основные выводы по диссертации:

1. В результате термодинамического моделирования получены данные о влиянии температуры и количества присутствующего в системе твердого углерода на степень восстановления железа, фосфора и марганца. При температуре меньше 877°C фосфор не восстанавливается при любом количестве углерода. Если в системе избыток углерода, то весь фосфор переходит в металл при температуре 927°C в виде соединения Fe_3P .

2. Термодинамическим расчетом показано и экспериментально подтверждено, что в легкоплавких железомарганцевых рудах можно производить твёрдофазное селективное восстановление железа и фосфора монооксидом углерода при температуре порядка 900°C , сохраняя марганец в оксидной фазе. Повышение температуры и увеличение продолжительности восстановительного обжига в атмосфере CO способствуют более полному переходу фосфора из оксидной фазы в металлическую.

3. Установлено, что при использовании в качестве восстановителя твердого углерода в металлическую часть при этих же условиях переходят не только железо и фосфор, но и некоторое количество марганца.

4. Определены условия жидкофазного разделения продуктов твёрдофазного восстановления некондиционных железомарганцевых руд на шлаковую и металлическую фазы. Определен химический состав полученных при этом металла и шлака.

5. Полученные в работе результаты позволяют рекомендовать технологическую схему получения низкофосфористого марганцевого шлака и легированного фосфором железа из железомарганцевых руд и концентратов. Предлагаемая схема позволяет решить важную для металлургической промышленности проблему, а именно – вовлечь в производство российские высокофосфористые железомарганцевые руды и заменить импорт.

Рекомендации для дальнейшего развития работы

Полученные в работе результаты показывают, что железо и фосфор из некондиционных железомарганцевых руд и концентратов восстанавливается и твёрдым углеродом и монооксидом углерода до металлического состояния. Таким образом, для получения концентрата оксидов марганца с низким содержанием железа и фосфора целесообразно производить предварительную металлизацию руды с использованием относительно слабого газообразного восстановителя – природного газа, в том числе обогащённого водородом или даже чистый водород, подбирать оптимальное сочетание температуры и продолжительности обжига. Использование в качестве восстановителя газов является актуальной задачей и в связи с мировым трендом на отказ от углеродных технологий.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ и международных базах данных:

1. Косдаулетов Н., Рошин В. Е. Определение условий селективного восстановления железа из железомарганцевой руды // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – №. 11-12. – С. 952-959. DOI:10.17073/0368-0797-2020-11-12-952-959. [ВАК].

Kosdauletov N., Roshchin V. E. Determining the Conditions for Selective Iron Recovery by Iron-Manganese Ore Reduction //Steel in Translation. – 2020. – Т. 50. – №. 12. – С. 870-876. DOI: 10.3103/S0967091220120050. [Scopus Q2].

2. Косдаулетов Н., Мухамбетгалиев Е.К., Рошин В.Е. Разделение компонентов железомарганцевой руды бесконтактным и контактными карботермическим восстановлением // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2021. Т. 64. № 10. – С. 761-767. /DOI.org/10.17073/0368-0797-2021-10-761-767. [ВАК].

Kosdauletov N., Mukhambetgaliev E. K., Roshchin V. E. Separation of Ferromanganese Ore Components by Reduction with Carbon and Carbon Monoxide //Steel in Translation. – 2022. – Т. 52. – №. 4. – С. 416-421. DOI: 10.3103/S0967091222040064. [Scopus Q2].

3. Косдаулетов, Н. Особенности твердофазного восстановления компонентов марганцевых руд разного генезиса / Н.И. Косдаулетов, В.Е. Рошин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 21–30. DOI: 10.14529/met210403. [ВАК].

4. Косдаулетов Н., Рошин А.В., Рошин В.Е. Получение высокомарганцевого шлака путём восстановления железа и фосфора в железомарганцевых рудах водородом // Черные металлы. 2024. № 2. – С. 4–9. DOI: 10.17580/chm.2024.02.01. [K2, RSCI, ВАК].

5. Kosdauletov N., Roshchin V. E. Estimation of selective reduction of iron and phosphorus from manganese ores of different genesis //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 966. – №. 1. – С. 012036. DOI:10.1088/1757-899X/966/1/012036. [Scopus Q4]

6. Kosdauletov N., Roshchin V. Solid-Phase Reduction and Separation of Iron and Phosphorus from Manganese Oxides in Ferromanganese Ore //Defect and Diffusion Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2021. – Т. 410. – С. 281-286. DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF.410.281. [Scopus Q3]

7. Kosdauletov N., Roshchin V. E. Evaluation of metallurgical properties of manganese ores of different genesis //AIP Conference Proceedings.– AIP Publishing LLC, 2022. – Т. 2456. – №. 1. – С. 020023. DOI org/10.1063/5.0074715. [Scopus Q4]

Другие публикации:

8. Косдаулетов Н., Рошин В.Е. Твердофазное восстановление железа из железомарганцевой руды. Материалы XVIII Международной конференции: «современные проблемы электрометаллургии стали» в 2 ч. / 2 часть под ред. В.Е. Рошина. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 135-141.

9. Косдаулетов Н. Пирометаллургическое отделение оксидов марганца железомарганцевой руды от железа и фосфора //Актуальные проблемы

недропользования. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 189-190.

10. Косдаулетов Н. Твердофазное восстановление компонентов марганцевых руд различных месторождений для получения высокомарганцевого шлака. Международный форум диалог металлургов: прогноз развития отрасли до 2030 года. ценовые и технологические решения. Москва: НИТУ «МИСиС», – 2022. – С. 49-51.

11. Косдаулетов Н., Рошин В.Е. Исследование условий перехода фосфора из некондиционных железомарганцевых руд в железо и получения высокомарганцевых шлаков. XVII Международный Конгресс сталеплавильщиков и производителей металла "От руды до стали" ISCON. Магнитогорск, 2023. – С. 222-226.

Косдаулетов Нурлыбай

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ
НИЗКОФОСФОРИСТЫХ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ ШЛАКОВ
ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД

Специальность 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 01.07.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. 1. Тираж 100 экз. Заказ 197/268.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.