

На правах рукописи



Ходосов Илья Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ КУЗБАССА**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» на кафедре металлургии черных металлов.

Научный руководитель: Нохрина Ольга Ивановна,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Ёлкин Константин Сергеевич,
доктор технических наук,
ООО «РУСАЛ ИТЦ»,
начальник отдела кремниевого производства

Страхов Владимир Михайлович,
Кандидат технических наук,
ОАО ВУХИН ОП «Кузнецкий центр»,
заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 28 февраля 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.252.01 при Сибирском государственном индустриальном университете по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровской области, ул. Кирова, 42. СибГИУ
Факс: (3843) 46-57-92.
E-mail: ds21225201@sibsiu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Автореферат разослан 29 декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Перспективным направлением в черной металлургии является производство и применение металлизированной шихты. Объемы производства металлизированных материалов неуклонно растут и к настоящему времени достигли 82 млн. т в год. Металлизированная шихта с содержанием металлического железа более 80 % является альтернативой металлическому лому и используется при выплавке сталей, чистых по примесям цветных металлов, в дуговых сталеплавильных печах.

Большая часть металлизированных материалов представлена окатышами или брикетами, полученными путем горячего брикетирования. Металлизированное сырье производят непосредственно из оксидного железосодержащего сырья без применения кокса, минуя аглодоменный передел, в печах шахтного типа с использованием в качестве восстановителя конвертированного природного газа. Такие технологии связаны с высоким расходом природного газа и технологически сложным процессом его конвертации. В последнее время за рубежом отмечается рост производства металлизированных материалов с использованием низкосортных углеродистых восстановителей, в основном углей. Наиболее востребованным металлизированным материалом, полученным с использованием углей, является гранулированное железо с содержанием железа ~ 99 %.

Изучение процессов твердофазного восстановления железа из оксидов с использованием углей в качестве восстановителей и разработка энергоэффективных технологий получения и применения металлизированных материалов является актуальным научным направлением в черной металлургии, в том числе и для металлургии Кузбасса, где потенциал запасов железных руд оценивается в 5 млрд. т, балансовые запасы угля составляют 600 млрд. т, металлургическая и угольная промышленности находятся на едином территориально-экономическом пространстве.

Диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки, технологии и техники Российской Федерации от 2011 г. – «Рациональное природопользование», основными задачами Государственной программы «Развитие науки и технологий» на 2013 – 2020 годы при грантовой поддержке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (ПГЗ № 1622).

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам получения металлизированного сырья с использованием твердых восстановителей уделяется большое внимание исследователей в отечественной и мировой науке. В настоящее время предложено более 100 различных способов использования угля в процессах металлизации. Данные процессы лежат в основе технологий металлизации и относятся к сложным гетерогенным физико-химическим превращениям. Многочисленные научные публикации свидетельствуют о перспективности этого направления.

Однако при использовании угля в качестве восстановителя при получении металлизированных материалов возникает ряд технологических проблем, связанных с недостаточной научной проработкой вопросов твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд. В данном случае возможным решением проблемы является научное обоснование и исследование процессов металлизации с применением углей разных марок.

Цель работы.

Теоретическое и экспериментальное подтверждение эффективности получения металлизированных материалов с использованием в качестве восстановителей углей разных марок.

Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Научно обосновать и экспериментально исследовать процессы твердофазного восстановления железа из железорудного сырья с использованием в качестве восстановителей углей разных марок:

- исследовать методами термодинамического моделирования процессы восстановления железа из оксидов железных руд с использованием в качестве восстановителей углей разных технологических марок;

- исследовать термохимические свойства углей разных технологических марок;

- установить технологические параметры энергоэффективных процессов металлизации;

- оценить возможность использования металлизированных рудоугольных материалов при выплавке стали и синтетического чугуна.

2. Научно-обосновать и экспериментально исследовать процесс получения гранулированного железа:

- определить закономерности процессов получения гранулированного железа при использовании в качестве восстановителей углей разных марок;

- установить технологические параметры процессов получения гранулированного железа.

3. Разработать технологические схемы процессов получения металлизированных материалов и гранулированного железа.

Научная новизна.

1. Методами термодинамического моделирования установлены закономерности изменения степени восстановления железа из оксидов гематит-магнетитовой руды от количества углей разных марок в рудоугольной смеси, состава и объема образующейся газовой фазы.

2. Установлены параметры процессов термического разложения углей разных марок: бурого – 2Б, длиннопламенного – Д, тощего – Т. Определены объемы и составы газовой фазы при температурах твердофазного восстановления железа из оксидов.

3. Научно обоснованы и экспериментально подтверждены составы рудоугольных смесей и температурно-временные условия для получения ме-

таллизованных материалов с содержанием $Fe_{мет} = 80 - 83 \%$ при использовании в качестве восстановителей углей разных марок.

4. Впервые выявлены и изучены условия и последовательность образования жидкоподвижных шлаковых фаз в процессах металлизации при изменении составов исходных рудоугольных смесей.

5. Установлена возможность получения гранулированного железа ($Fe_{мет} \sim 99 \%$) двухстадийным процессом: 1 стадия – получение металлизированного полупродукта со степенью металлизации $75 - 80 \%$; 2 стадия – нагрев полупродукта до $1573 - 1673 \text{ K}$ для разделения металлической и шлаковой фаз.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Установлены технологические режимы эффективной металлизации при использовании в качестве восстановителей углей разных марок.

2. Установлена принципиальная возможность и определены оптимальные условия, способствующие разделению металлической и шлаковой фаз при получении гранулированного железа.

3. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана технология процесса получения металлизированных материалов при использовании гематит-магнетитовой железной руды и углей разных технологических марок.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана технологическая схема процесса производства гранулированного железа, включающая твердофазное восстановление железа из рудоугольной смеси и рафинирование полученного продукта от оксидных фаз.

5. Разработана и передана к внедрению на ЗАО «Западно-Сибирское геологическое управление» технологическая документация по производству металлизированных материалов.

6. Разработаны и переданы к внедрению на ООО «РМЗ на НКАЗ» технологические рекомендации выплавки синтетического чугуна в индукционных печах с использованием в шихте металлизированных рудоугольных окатышей.

7. Научные результаты работы внедрены в практику подготовки студентов по направлению 22.03.02 – Металлургия в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Методология и методы исследования.

Работа выполнена с использованием комплекса современных теоретических и экспериментальных методов: термодинамическое моделирование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов; исследования химического и фазового состава исходных материалов и продуктов металлизации; дифференциально-термического анализа углей разных марок; исследование кинетики восстановления железа из оксидов руды термогравиметрическим методом; проведение лабораторных плавок стали в дуговой сталеплавильной печи; промышленных плавок синтетического чугуна в высокочастотной индукционной печи ИСТ-1 с отбором и анализом проб металла и

шлака; использование методов математической статистики и вычислительного пакета прикладных программ Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты физико-химической аттестации и изучения свойств исследуемых материалов: железной руды, коксовой мелочи, углей разных марок (бурый марки 2Б; длиннопламенный марки Д; тощий марки Т; слабоспекающийся марки СС).

2. Результаты термодинамического моделирования процессов твердофазного восстановления железа из оксидов гематит-магнетитовой железной руды с использованием в качестве восстановителей углей разных марок.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железорудного сырья при использовании в качестве восстановителей углей разных марок для получения металлизированных материалов с содержанием $Fe_{мет} = 80 - 83 \%$ и гранулированного железа с содержанием $Fe_{мет} \sim 99 \%$.

4. Технологические схемы производства металлизированных рудоугольных окатышей и гранулированного железа с использованием в качестве восстановителей углей.

5. Технологические рекомендации по использованию металлизированных рудоугольных окатышей при выплавке синтетического чугуна.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.16.02 – Metallurgy черных, цветных и редких металлов п. 1 «Рудное, нерудное и энергетическое сырье», п. 3 «Твердофазные процессы в металлургических системах», п. 9 «Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается совместным использованием современных методов теоретического и экспериментального исследования процессов твердофазного восстановления железа из оксидов при использовании в качестве восстановителей углей разных марок, качеством измерений их характеристик и статистической обработкой результатов; применением широко распространенных разнообразных и апробированных методов анализа; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: VIII Международной научно-практической конференции «Молодежь и наука: реальность и будущее» (Новокузнецк, 2014); XVII Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2014); XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Новокузнецк, 2014); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (Кемерово, 2014); Всероссийской научной кон-

ференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (Новокузнецк, 2015); Конкурсе «Научно-инновационные разработки молодых ученых СибГИУ». (Новокузнецк, 2015); IV Конференции молодых ученых «Актуальные вопросы углехимии и химического материаловедения» (Кемерово, 2015); XVI международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Магнитогорск, 2015); XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015); VIII Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2016).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 29 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 7 статей в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и трех приложений. Изложена на 164 страницах, содержит 40 рисунков, 38 таблиц и список литературных источников из 175 наименований.

Основное содержание работы

Во введении отражена цель работы и задачи исследования, показана ее актуальность, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, степень достоверности и разработанности.

В первой главе проведен обзор научных работ, посвященных технологиям получения и применения металлизированных материалов, даны характеристики железорудного сырья и ископаемых углей Кемеровской области. Показано, что при производстве металлизированных материалов перспективным направлением является использование в качестве восстановителей твердых углеродистых материалов, в том числе углей разных технологических марок. При использовании угля в качестве восстановителя возможно получение перспективного металлургического сырья – гранулированного железа, отличающегося высоким содержанием металлического железа и отсутствием примесей цветных металлов.

По результатам изучения состояния вопроса были сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе проведено термодинамическое исследование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов при использовании в качестве восстановителей углей разных технологических марок. Моделирование процессов осуществлялось с использованием программного комплекса «Терра».

На первом этапе исследований были проведены расчеты на модельной элементарной системе Fe–C–O. Модель элементарной системы с поэлементным составом Fe–C–O формировалась путем задания исходного состава сме-

си в виде 1 моля оксида Fe_2O_3 и разного количества молей углерода (n_c) и кислорода (m_o). При моделировании процессов определяли оптимальные: температуры, количества углерода и значения $-m_o/n_c$, обеспечивающих полное восстановление железа.

Анализ результатов расчета показал наличие трех областей: восстановительной области, которая существует при значениях параметра $m_o/n_c < 0,2$; переходной области, характеризующейся снижением концентрации восстановленного железа до его полного исчезновения и ростом содержания FeO в конденсированной фазе; окислительной области, начинающейся при значении параметра $m_o/n_c = 0,5$, когда в конденсированной фазе полностью отсутствует восстановленное железо. При значении $m_o/n_c = 0,95$ в газовой фазе исчезает CO , а в конденсированной – FeO . Наилучшим условиям для восстановления железа из оксидов соответствует значение показателя параметра $m_o/n_c < 0,2$ при температурах 1173 – 1373 К.

При термодинамическом моделировании процессов твердофазного восстановления железа из оксидов руды с применением в качестве восстановителей углей разных марок (бурого угля марки 2Б, длиннопламенного угля марки Д, слабоспекающегося угля марки СС) термодинамическая система была представлена элементами Н, О, S, N, С, Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, К. По результатам расчетов равновесного состояния, были выбраны значимые вещества, из которых в газовой фазе могут присутствовать H_2 , H_2O , H_2S , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 ; в конденсированной – С, Fe, FeO , FeS , Fe_3C , SiO_2 , Al_2O_3 , MgSiO_3 , $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$, CaCO_3 , CaSiO_3 , $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$.

Результаты термодинамических исследований (рисунок 1) показали, что оптимальным удельным расходом восстановителей, необходимым для полного восстановления железа из руды заданного состава, является 0,25 кг/кг для угля марки 2Б, 0,20 кг/кг для угля марки Д и 0,15 кг/кг для угля марки СС. Превышение этих значений в процессе восстановления нецелесообразно и приведет к изменению состава газовой фазы (увеличению концентрации монооксида углерода и водорода и уменьшению концентрации CO_2 и H_2O), и при низких температурах металлизации к образованию карбидов железа.

При твердофазном восстановлении железа из оксидов железной руды основными компонентами конденсированной фазы являются металлическое железо, оксиды железа и кремния, при этом содержание монооксида железа и железа металлического изменяется в широких пределах: FeO от 0 до 75,04 %; Fe от 0 до 68,47 %. Содержание диоксида кремния изменяется от 19,03 до 22,65 %. Содержание остальных компонентов изменяется незначительно.

При совместном анализе состава конденсированных фаз и диаграммы состояния $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, определено, что при соблюдении соотношения SiO_2/FeO в диапазоне 0,25 – 0,44 возможно образование эвтектики с температурой плавления ~ 1373 К.

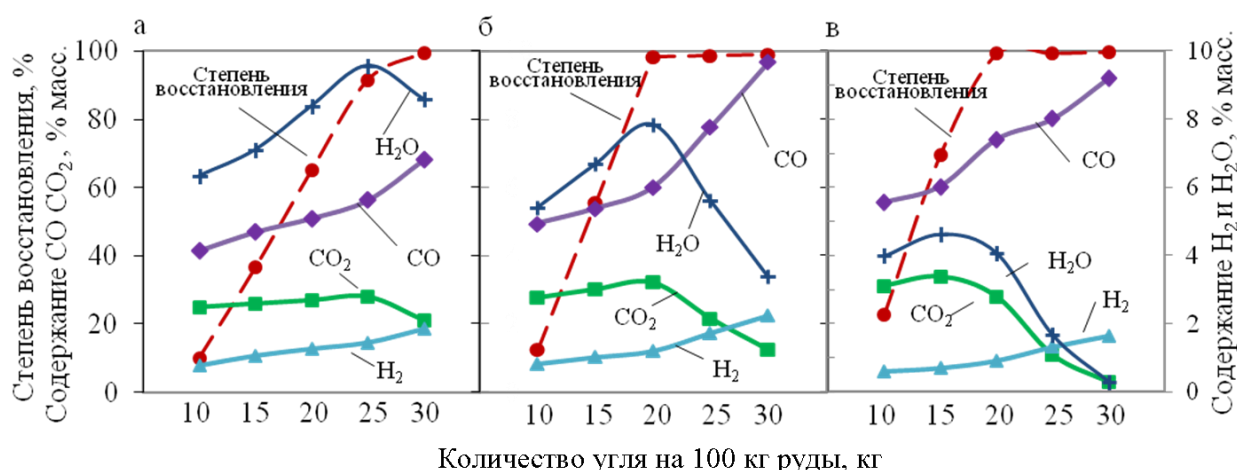


Рисунок 1 – Зависимость степени восстановления железа и состава газовой фазы от расхода бурого угля (а), длиннопламенного угля (б) и слабоспекающегося (в) при температуре 1273 К

Расчет равновесных составов конденсированных фаз показал (рисунок 2), что при изменении количества восстановителя в рудоугольной смеси можно получать металлизированные материалы с оксидной фазой, обеспечивая раннее шлакообразование, что может быть использовано для эффективного разделения металлической и шлаковой фаз при получении гранулированного железа.

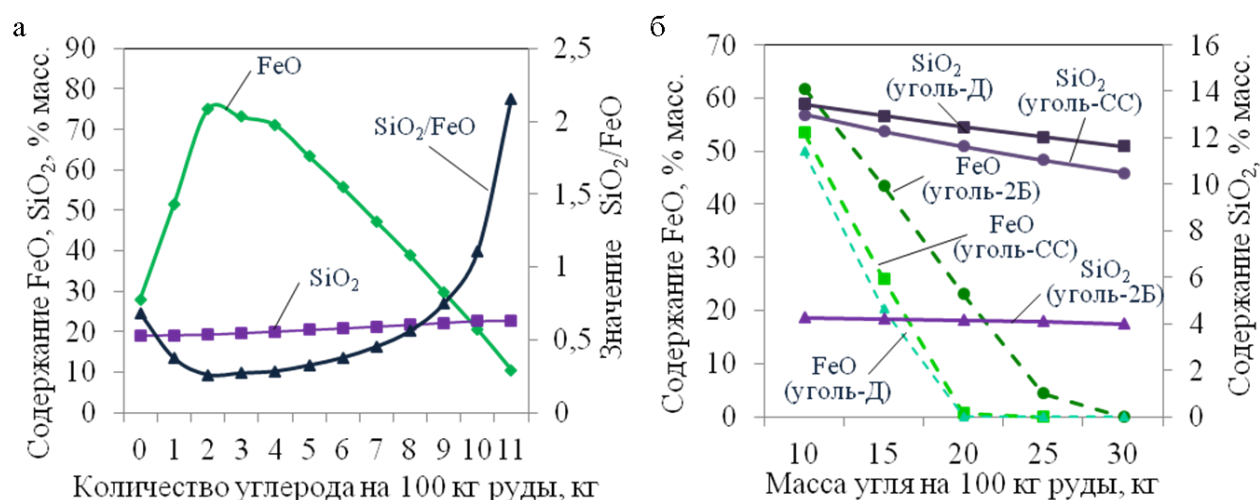


Рисунок 2 – Изменение содержания FeO, SiO_2 в конденсированной фазе от количества углерода (а), и угля (б) в рудоугольной смеси при температуре металлизации 1573 К

В третьей главе приведены методики изучения процессов металлизации и результаты определения физико-химических характеристик экспериментальных материалов: железных руд и углей разных марок (уголь бурый марки 2Б, уголь длиннопламенный марки Д, уголь слабоспекающийся марки СС, уголь тощий марки Т).

В качестве железосодержащих материалов были использованы гематит-магнетитовые железные руды и концентраты, полученные в результате их обогащения (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав экспериментальных железосодержащих материалов

Материал	Массовая доля компонентов, %								Влага
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	S	
Железная руда проба № 1	44,19	27,49	13,74	3,99	9,63	2,29	0,117	0,56	4,51
Железная руда проба № 2	52,3	29,24	19,15	3,31	0,94	0,76	0,072	0,42	5,78
Концентрат № 1	57,45	28,33	9,36	2,48	4,03	2,14	0,03	0,69	5,84
Концентрат № 2	61,2	23,51	7,92	2,41	1,96	2,31	0,02	0,41	6,27

Для исследуемых восстановителей были определены технические характеристики, состав золы и элементный состав (таблица 2).

Большое влияние на процессы твердофазного восстановления железа из оксидов при восстановительном обжиге рудоугольной шихты оказывает поведение восстановителя, в связи с этим были изучены процессы термического разложения используемых углей. Результаты термогравиметрических исследований показали (рисунок 3), что процесс термического разложения исследуемых марок углей протекает согласно общим закономерностям и включает в себя две стадии: стадия I – удаление гигроскопической и коллоидносвязанной влаги; стадия II – резкое изменение массы угля, вызванное выделением летучих и продуктов газификации угля.

Для бурого угля II-я стадия начинается при температуре 443 К, то есть на 60 градусов ниже, чем термическое разложение длиннопламенного угля, и

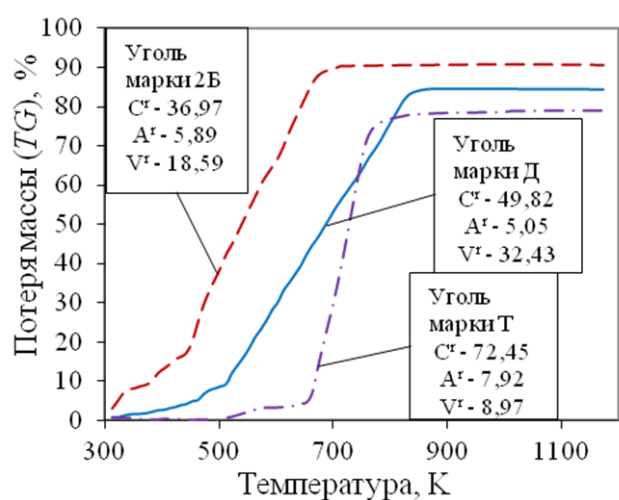


Рисунок 3 – Результаты термогравиметрического анализа углей

на 210 градусов ниже, чем разложение тощего. Количество газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разложении бурого угля, существенно больше, чем при разложении длиннопламенного и тощего. Потеря массы бурого угля составила 90,6 %, длиннопламенного – 84,5 %, тощего – 78,3 %. Процесс термического разложения длиннопламенного угля протекает менее интенсивно в сравнении с остальными рассматриваемыми марками углей.

Таблица 2 – Физико-химические характеристики, состав золы и элементный состав восстановителей

Наименование характеристики	Значение характеристики				
	Марка угля				Коксовая мелочь
	2Б	Д	СС	Т	
C_{fix} (содержание фиксированного углерода), %	49,1	55,6	70,2	76,3	84,4
V^r (выход летучих веществ на сухую беззольную массу), %	42,1	36,0	20,6	9,34	2,1
W^r (влажность на рабочую массу), %	24,7	10,4	6,7	5,1	1,2
A^d (зольность на сухую массу), %	7,83	5,64	6,41	8,34	12,3
Химический состав золы, %:					
Fe_2O_3	10,30	8,17	7,4	16,4	13,12
Al_2O_3	5,40	25,6	16,3	25,0	23,72
CaO	45,30	9,70	2,5	5,38	5,15
MgO	5,90	3,70	1,58	1,66	1,76
P_2O_5	0,20	1,80	0,37	0,75	0,69
SiO_2	26,90	50,0	46,6	47,9	47,9
S	0,68	0,61	0,02	0,41	0,02
Элементный состав, %:					
C^{daf} (содержание углерода на сухую беззольную массу), %:	70,41	72,02	85,30	91,6	96,97
H^{daf} (содержание водорода на сухую беззольную массу), %:	3,88	6,12	4,78	3,20	0,56
N^{daf} (содержание азота на сухую беззольную массу), %:	0,98	1,74	2,16	1,80	1,42
O^{daf} (содержание кислорода на сухую беззольную массу), %:	22,58	20,12	6,52	2,3	0,56
S^{daf} (содержание серы на сухую беззольную массу), %:	1,15	0,34	0,14	0,32	0,51

Объем и состав газов, образующихся при термическом разложении углей, определяли путем нагрева угля в нейтральной атмосфере до температуры 1173 К в лабораторной печи SNOL 02-1250, оборудованной системой отбора и анализа газа. Результаты экспериментов показали, что наибольшее количество газовой фазы образуется при термическом разложении бурого и длиннопламенного углей – 1,7 и 1,4 л/г; при разложении тощего и слабоспекающегося углей образуется 0,85 и 0,80 л/г соответственно.

Анализ химического состава газов показал, что газовая фаза углей преимущественно состоит из водорода. Наибольшее количество водорода содержится в газовой фазе бурого угля, а наибольшее количество монооксида углерода содержится в газовой фазе угля марки Д. Для исследуемых марок углей характерен следующий состав газовой фазы: H_2 72 – 75 %, CO 10 – 12 %, CO_2 1 – 2 %, CH_4 1 – 2 %, C_2H_6 0,5 – 1 %, C_3H_8 0,5 – 1 %, C_4H_{10} 0,5 – 1 %, C_5H_{12} 0,5 – 1 %, C_6H_{14} 0,5 – 1 %, C_7H_{16} 0,5 – 1 %, C_8H_{18} 0,5 – 1 %, C_9H_{20} 0,5 – 1 %, $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{11}\text{H}_{24}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{19}\text{H}_{40}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{21}\text{H}_{44}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{23}\text{H}_{48}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{26}\text{H}_{54}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{27}\text{H}_{56}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{28}\text{H}_{58}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{29}\text{H}_{60}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{31}\text{H}_{64}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{32}\text{H}_{66}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{33}\text{H}_{68}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{34}\text{H}_{70}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{35}\text{H}_{72}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{36}\text{H}_{74}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{37}\text{H}_{76}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{38}\text{H}_{78}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{39}\text{H}_{80}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{40}\text{H}_{82}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{41}\text{H}_{84}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{42}\text{H}_{86}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{43}\text{H}_{88}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{44}\text{H}_{90}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{45}\text{H}_{92}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{46}\text{H}_{94}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{47}\text{H}_{96}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{48}\text{H}_{98}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{49}\text{H}_{100}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{50}\text{H}_{102}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{51}\text{H}_{104}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{52}\text{H}_{106}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{53}\text{H}_{108}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{54}\text{H}_{110}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{55}\text{H}_{112}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{56}\text{H}_{114}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{57}\text{H}_{116}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{58}\text{H}_{118}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{59}\text{H}_{120}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{60}\text{H}_{122}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{61}\text{H}_{124}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{62}\text{H}_{126}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{63}\text{H}_{128}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{64}\text{H}_{130}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{65}\text{H}_{132}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{66}\text{H}_{134}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{67}\text{H}_{136}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{68}\text{H}_{138}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{69}\text{H}_{140}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{70}\text{H}_{142}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{71}\text{H}_{144}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{72}\text{H}_{146}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{73}\text{H}_{148}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{74}\text{H}_{150}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{75}\text{H}_{152}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{76}\text{H}_{154}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{77}\text{H}_{156}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{78}\text{H}_{158}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{79}\text{H}_{160}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{80}\text{H}_{162}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{81}\text{H}_{164}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{82}\text{H}_{166}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{83}\text{H}_{168}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{84}\text{H}_{170}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{85}\text{H}_{172}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{86}\text{H}_{174}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{87}\text{H}_{176}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{88}\text{H}_{178}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{89}\text{H}_{180}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{90}\text{H}_{182}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{91}\text{H}_{184}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{92}\text{H}_{186}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{93}\text{H}_{188}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{94}\text{H}_{190}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{95}\text{H}_{192}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{96}\text{H}_{194}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{97}\text{H}_{196}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{98}\text{H}_{198}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{99}\text{H}_{200}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{100}\text{H}_{202}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{101}\text{H}_{204}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{102}\text{H}_{206}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{103}\text{H}_{208}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{104}\text{H}_{210}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{105}\text{H}_{212}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{106}\text{H}_{214}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{107}\text{H}_{216}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{108}\text{H}_{218}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{109}\text{H}_{220}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{110}\text{H}_{222}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{111}\text{H}_{224}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{112}\text{H}_{226}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{113}\text{H}_{228}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{114}\text{H}_{230}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{115}\text{H}_{232}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{116}\text{H}_{234}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{117}\text{H}_{236}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{118}\text{H}_{238}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{119}\text{H}_{240}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{120}\text{H}_{242}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{121}\text{H}_{244}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{122}\text{H}_{246}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{123}\text{H}_{248}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{124}\text{H}_{250}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{125}\text{H}_{252}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{126}\text{H}_{254}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{127}\text{H}_{256}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{128}\text{H}_{258}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{129}\text{H}_{260}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{130}\text{H}_{262}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{131}\text{H}_{264}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{132}\text{H}_{266}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{133}\text{H}_{268}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{134}\text{H}_{270}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{135}\text{H}_{272}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{136}\text{H}_{274}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{137}\text{H}_{276}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{138}\text{H}_{278}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{139}\text{H}_{280}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{140}\text{H}_{282}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{141}\text{H}_{284}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{142}\text{H}_{286}$ 0,5 – 1 %, $\text{C}_{$

CO 9 – 16 %, CO₂ 2 – 12 %, CH₄ 4 – 7 %, газы подобного состава (H₂ + CO = 80 – 91 %) используют при каталитической конверсии газа при металлизации в шахтных печах.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований технологических режимов получения и применения металлизированных материалов с использованием в качестве восстановителей углей разных марок.

При изучении кинетики твердофазного восстановления железа из оксидов с использованием угля в качестве восстановителя установлено, что при температурах 1173, 1273, 1373 К наибольшая скорость восстановления железа наблюдается при использовании бурого угля (рисунок 4, а), а при температуре 1473 К – при использовании длиннопламенного и тощего углей (рисунок 4, б).

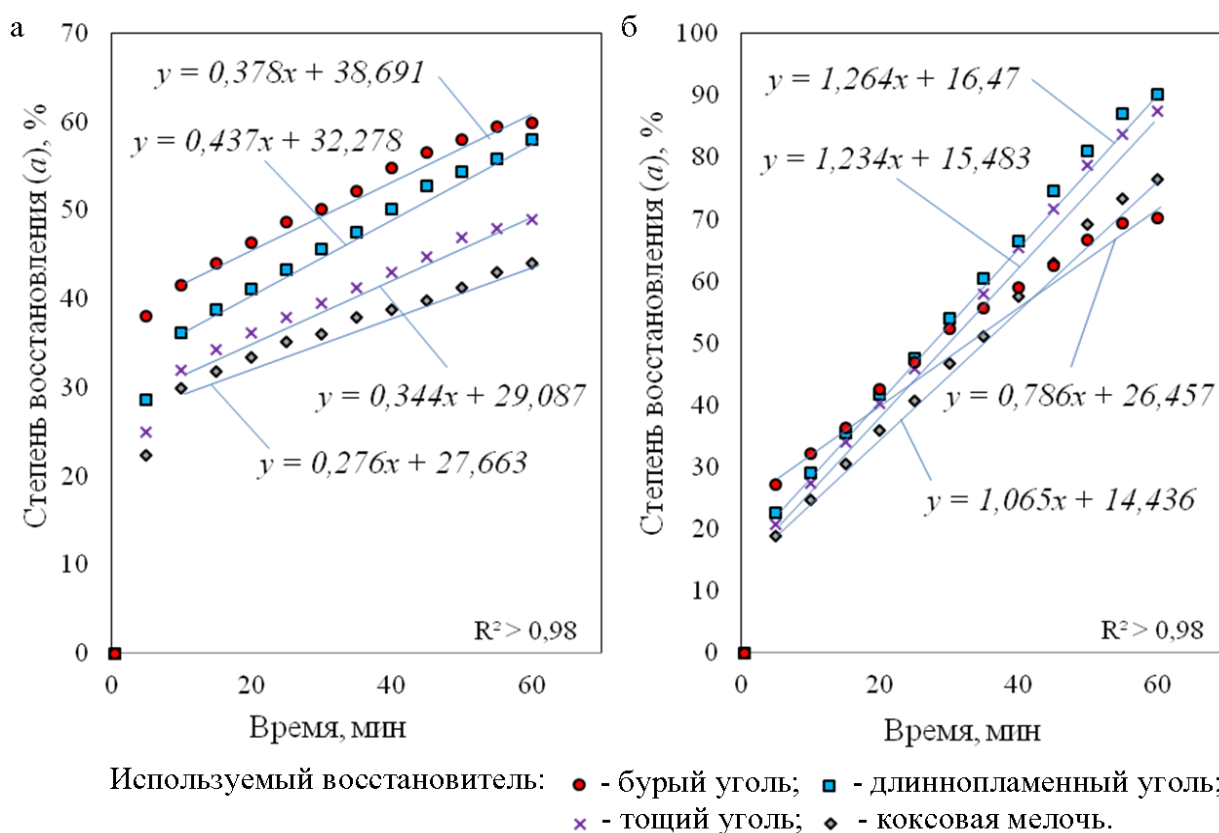


Рисунок 4 – Зависимость степени восстановления железа из оксидов от вида восстановителя и продолжительности изотермической выдержки при температуре 1273 К (а) и 1473 К (б)

Наименьшая скорость восстановления наблюдается при использовании коксовой мелочи, что подтверждают результаты химического анализа образцов и расчеты степени металлизации.

Установлено, что при температурах изотермической выдержки 1173, 1273 и 1373 К наибольшее содержание железа и самая высокая степень металлизации наблюдается в рудоугольных композициях с использованием в качестве восстановителя бурого угля. Эти показатели соответственно имеют

значения: $Fe_{мет}$ – 51,1, 64,0, 72,3 %, $\phi_{мет}$ – 76, 87, 92 %. При температуре 1473 К показатели снижаются и составляют: $Fe_{мет}$ – 76,3 % и $\phi_{мет}$ – 89 %. При использовании в качестве восстановителя тощего и длиннопламенного углей $Fe_{мет}$ – 80,0 и 83,1 % при $\phi_{мет}$ – 96 и 98 % соответственно.

Полученные результаты показывают, что угли с низкой степенью метаморфизма и высоким содержанием летучих обладают более высокими восстановительными свойствами при твердофазном восстановлении железа из оксидов при температурах металлизации не более 1373 К. В то же время для данных углей характерна высокая основность (CaO/SiO_2) минеральной части. Так для углей марок Д и Т основность минеральной части составляет 0,194 и 0,112, а для бурого угля (марка 2Б) 1,68. Поэтому при температуре металлизации 1473 К при использовании в качестве восстановителя бурого угля происходит образование ранних шлаковых фаз, которые, по-видимому, закупоривают газопроводящие каналы в рудоугольной композиции, в результате чего происходит замедление твердофазного восстановления железа из оксидов.

Фазовый и структурный анализ металлизированных материалов показал, что во всех экспериментах продуктом восстановительного обжига является губчатый материал с развитым в той или иной степени металлическим каркасом. Основные фазы: металлическое железо, оливины и аморфный углерод. При использовании в качестве восстановителя бурого угля характерно наличие на границе с металлической фазой силикатной составляющей (рисунк 5).

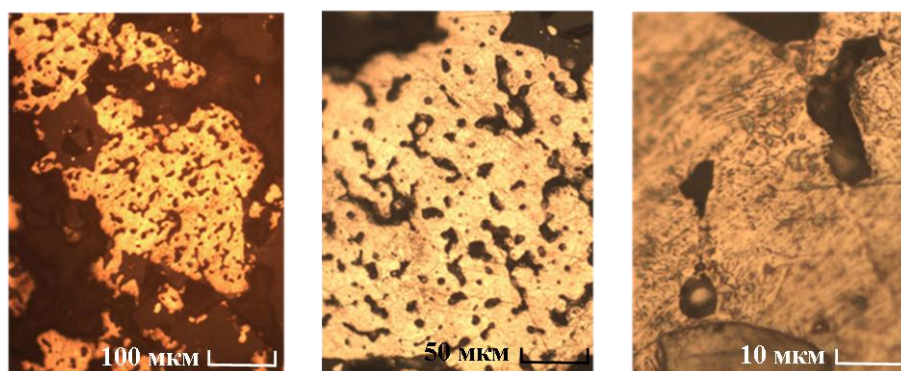


Рисунок 5 – Структуры металлизированных материалов, полученных при температуре изотермической выдержки 1473 К и времени 60 мин с использованием бурого угля в качестве восстановителя

При экспериментальном определении параметров процесса эффективной металлизации железорудного сырья с использованием угля в качестве восстановителя было установлено, что в восстановительных процессах участвует газовая фаза, образующаяся в результате термического разложения угля.

Металлизация рудоугольных брикетов в угольной засыпке позволяет снизить количество восстановителя в брикете, повысить содержание метал-

лического железа и снизить содержание углерода в продуктах металлизации. Результаты экспериментов (рисунок 6) показали, что увеличение количества восстановителя в смеси не приводит к увеличению содержания металлического железа в материале. Как видно из рисунка 6, а при использовании длиннопламенного, тощего и слабоспекающегося углей оптимальным является количество восстановителя равное 90 % от стехиометрически необходимого, а при использовании бурого угля возможно применение еще меньшего количества угля – 80 % от стехиометрически необходимого. При этом при использовании бурого угля максимальное содержание металлического железа не превышает 78 %. Увеличение количества угля в рудоугольной смеси независимо от марки угля приводит к увеличению степени металлизации (рисунок 6, б).

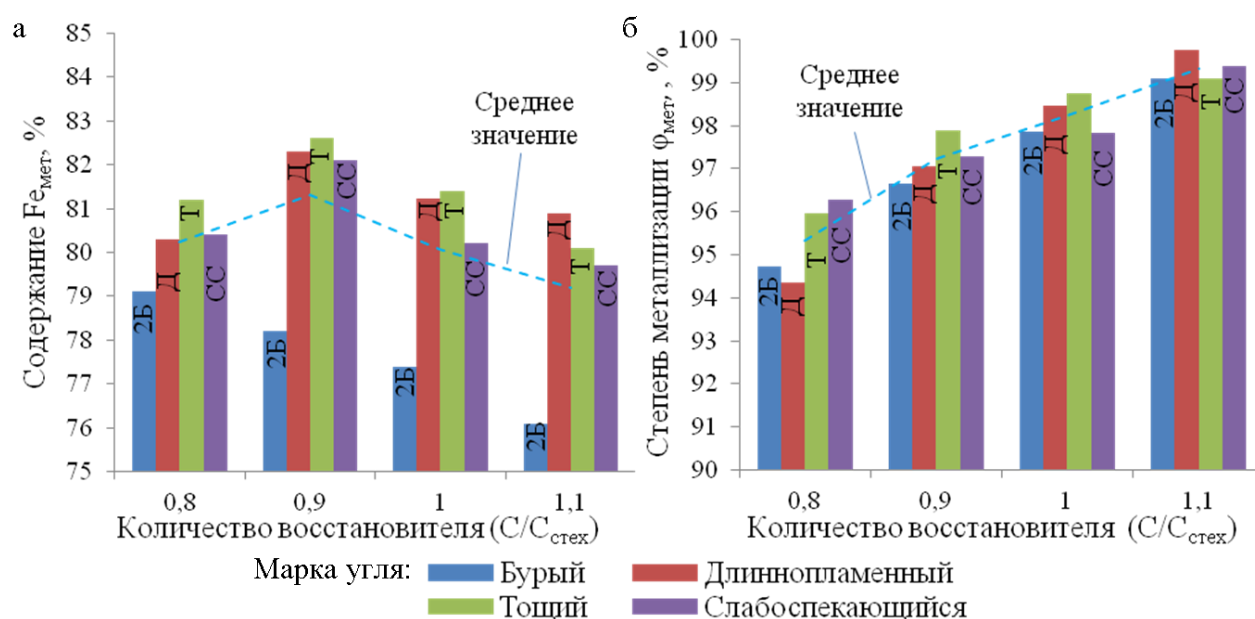


Рисунок 6 – Содержание Fe_{мет} (а) и значение степени металлизации (б) от количества восстановителя в рудоугольной смеси

По результатам экспериментальных исследований установлены оптимальные параметры металлизации при получении металлизированных материалов с содержанием металлического железа более 80 %:

- условия обжига – наличие угольной засыпки;
- температура восстановительного обжига 1373 К;
- время изотермической выдержки 60 мин.

Технико-экономический анализ производства металлизированных материалов и сравнение получаемых качественных и стоимостных показателей с аналогичными показателями для металлизированных окатышей, получаемых по технологии «Midrex», свидетельствуют об определенных конкурентных перспективах разработанного технологического решения. Снижение затрат

на восстановитель и топливо составило 13 % на тонну металлизированных продуктов.

Результаты исследований использованы ООО «Западно-Сибирское геологическое управление» при проектировании опытно-промышленного модуля по производству железа прямого восстановления, что подтверждено актом.

Результаты аттестации физико-химических характеристик металлизированных материалов, полученных с использованием в качестве восстановителей углей разных технологических марок показали, что при использовании углей марок Д, Т, СС металлизированные материалы содержат достаточное количество металлического железа 80 – 83 % при степени металлизации более 95 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к металлизированным продуктам для выплавки стали в дуговых электропечах. Определение прочностных характеристик показало, что металлизированные материалы обладают достаточной стойкостью к разрушению при транспортировке, хранении и загрузке материалов в печь без значительных потерь.

Полученные металлизированные материалы были использованы при выплавке стали в лабораторной 10-кг дуговой электропечи и выплавке синтетического чугуна в индукционной печи ИСТ-1 в литейном цехе ремонтно-механического завода.

Результаты экспериментальных плавов стали показали, что при использовании металлизированных окатышей, полученных по разработанной технологии металлизации, выплавлена сталь заданного состава (марка Ст3). Химический анализ готового металла показал уменьшение содержания фосфора и цветных металлов (Ni, Cu). Количество шлака составило 15 – 25 % от массы металла, что несколько выше показателей выплавки стали при использовании металлизированных окатышей, полученных без использования угля, где количество шлака составляет 10 – 20 % от массы металла. Несмотря на это, экспериментальные плавки протекали спокойно без осложнения технологического режима по двухшлаковой технологии.

Опытные плавки синтетического чугуна с использованием металлизированных рудугольных окатышей были проведены в литейном цехе ремонтно-механического завода ОАО «РМЗ на НКАЗе» на тигельной индукционной печи ИСТ-1. Определено, что при порционной подаче окатышей в тигель, заполненный расплавом на 55 – 60 %, происходит эффективное затягивание окатышей вглубь ванны печи, за счет электромагнитного перемешивания. С увеличением доли металлизированных окатышей в шихте количество шлака возрастает. На каждые 100 кг окатышей образовалось 8 – 12 кг шлака.

Изделия, отлитые из полученного чугуна при замене до 30 % металлического лома на металлизированные рудугольные окатыши, отвечали всем предъявляемым требованиям, по количеству дефектов не отличались от литых изделий, полученных ранее с использованием чугуна, выплавленного на обычной шихте.

В ходе экспериментальных исследований были определены оптимальные параметры получения гранулированного железа: изотермическая выдержка в течение 10 мин при 1573 К в нейтральной атмосфере для металлизированных полупродуктов со степенью металлизации 75 – 80 %. Установлено, что наименьшая температура начала образования видимых, размером более 1 мм, металлических гранул составила 1523 К для смеси с использованием в качестве восстановителя бурого угля. По результатам исследований установлено, что эффективное образование жидкоподвижных шлаковых фаз происходит в результате повышения температуры при наличии FeO и ограничении развития реакций восстановления (при подаче в печь нейтрального газа). Для металлизированных материалов с низкой степенью металлизации (менее 80 %) процесс образования жидкоподвижных фаз и коагуляции металлических капель происходит при температурах 1573 – 1673 К.

Результаты экспериментальных исследований по изучению процессов получения гранулированного железа показали, что процесс реализуется в две основные стадии: I стадия – получение металлизированного материала с содержанием $Fe_{мет}$ 56 – 59 % и степенью металлизации не более 80 %; II стадия – жидкофазное разделение шлаковой и металлической фаз. Экспериментально определены технологические параметры осуществления этих стадий. I стадия – температура 1373 К и продолжительность процесса – 30 мин; II стадия – температура 1573 – 1673 К и продолжительность 10 мин. При этом на второй стадии необходимо ограничение восстановительных процессов.

Спектральный анализ металлических гранул показал высокое содержание металлического железа, близкого к 99 %, при содержании углерода менее 1 %, кремния и алюминия менее 0,5 %, серы и фосфора менее 0,1 %.

Предложена технологическая схема получения гранулированного железа (рисунок 8), включающая получение металлизированного полупродукта со степенью металлизации 75 – 80 %, последующее отделение угольного остатка. После чего полупродукт подвергают выдержке в течение 10 мин в нейтральной атмосфере при температуре 1573 Т. Полученный материал охлаждают и подвергают механической и магнитной сепарации для разделения шлака и гранулированного железа.

В приложениях приведены результаты термодинамических расчетов и акты, подтверждающие внедрение результатов работы.

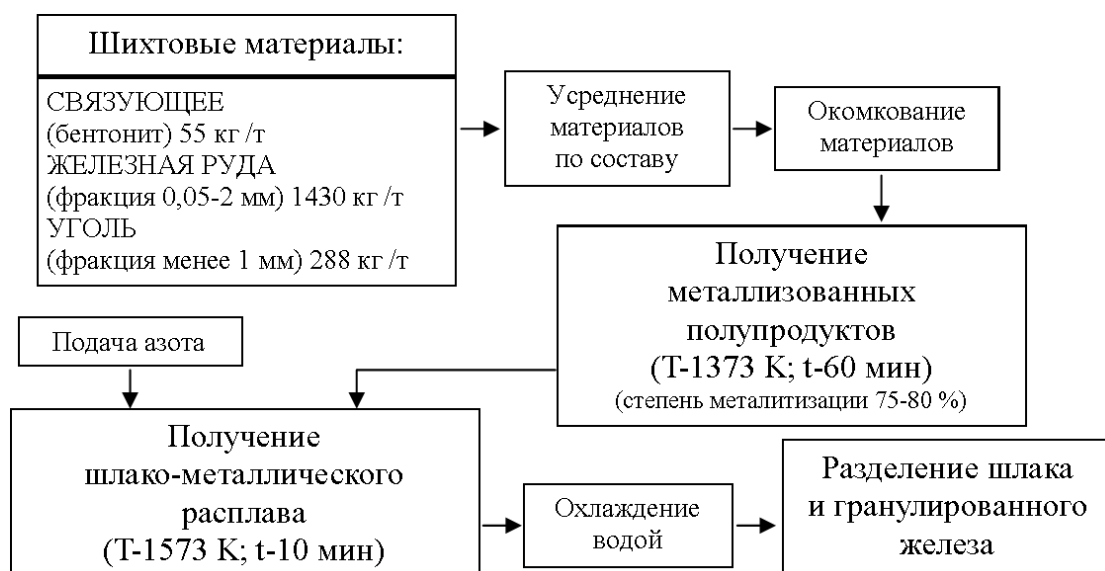


Рисунок 8 – Технологическая схема получения гранулированного железа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы, направленной на разработку научных и технологических основ процессов получения металлизированных материалов и гранулированного железа с использованием сырьевой базы Кемеровской области, получены следующие основные результаты:

1. Методами термодинамического моделирования установлены зависимости равновесной степени восстановления железа, состава и объема газовой фазы, образующейся в процессе твердофазного восстановления железа из оксидов железной руды от расхода углей разных марок: угля бурого марки 2Б; угля длиннопламенного марки Д; угля слабоспекающегося марки СС. Определены оптимальные соотношения углей и железной руды, соответствующие полному восстановлению железа из руды.

2. По результатам моделирования выявлены соотношения между количеством и составом пустой породы руды и золы восстановителя в рудовосстановительной смеси, способствующие получению перспективного металлургического сырья – гранулированного железа с содержанием $Fe_{мет} \sim 99 \%$; $C < 1 \%$; $Al + Si < 0,5 \%$; $S < 0,1 \%$; $P < 0,1 \%$ масс.

3. Исследован процесс термического разложения углей марок бурый, длиннопламенный, тощий при температурах твердофазного восстановления, проанализированы объемы и составы газовых фаз. Установлено, что для исследуемых марок углей характерен следующий состав газовой фазы: 72 – 75 % H_2 , 9 – 16 % CO , 2 – 12 % CO_2 , 4 – 7 % CH_4 . Показана принципиальная возможность участия образующейся газовой фазы при твердофазном восстановлении железа из оксидов железной руды.

4. Экспериментально определено влияние температуры изотермической выдержки на скорость и степень твердофазного восстановления железа из оксидов железной руды при использовании в качестве восстановителей

углей разных технологических марок и коксовой мелочи. Получены эмпирические уравнения зависимости степени восстановления от времени изотермической выдержки для разных температур металлизации. Показано, что изменение степени восстановления от температуры с высокой точностью описывается линейной зависимостью, а изменение скорости восстановления от температуры – экспоненциальной.

Установлено, что продуктом твердофазного восстановления железа из оксидов в интервале температур 1273 – 1473 К является губчатый материал с развитым в той или иной степени металлическим каркасом. Определен состав металлизированных материалов: металлическое железо, вюстит, стекло и аморфный углерод.

5. Показано, что угли с низкой степенью метаморфизма и высоким содержанием летучих обладают более высокими восстановительными свойствами при твердофазном восстановлении железа из оксидов железной руды. В то же время для углей с низкой степенью метаморфизма характерна высокая основность минеральной части. По-видимому, при более высокой температуре металлизации 1473 К с использованием в качестве восстановителя бурого угля происходит образование силикатных шлаковых фаз, которые закупоривают газопроводящие каналы, в результате чего происходит замедление твердофазного восстановления железа из оксидов в рудоугольном брикете. Раннему образованию шлаковой фазы способствует высокое содержание оксидов кальция в золе бурого угля.

6. Определены технологические параметры получения гранулированного железа с содержанием Fe ~ 99 %, C < 1 %, Al + Si < 0,5 %, S < 0,1 %, P < 0,1 % масс. В основе технологического решения лежит двухстадийный процесс: 1 – получение металлизированного продукта при температуре изотермической выдержки 1373 К в течение 30 мин; 2 – разделение металлической и шлаковой фаз при нагреве металлизированного полупродукта до 1573 – 1673 К в нейтральной атмосфере. Установлено, что эффективное разделение фаз при этих температурах возможно при получении в металлизированном полупродукте соотношения SiO_2/FeO близкого к 0,45.

7. Разработаны технологические предложения для ЗАО «Западно-Сибирское геологическое управление», включающие технологию производства металлизированных материалов с использованием железной руды Мундыбашского месторождения и углей разных технологических марок для проектирования опытно-экспериментального модуля по производству железа прямого восстановления.

8. Показана принципиальная возможность использования металлизированных материалов, полученных по разработанной технологии, при выплавке стали в электродуговых печах и синтетического чугуна в индукционных печах.

9. Научные результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс, реализуемый кафедрой «Металлургия черных металлов» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

при подготовке бакалавров и магистров по направлению 22.03.02 – Metallurgy в рамках дисциплин «Metallurgy of black metals», «KNIP» и при выполнении ВКР, что подтверждено актом о внедрении в учебный процесс.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных из перечня ВАК:

1. Нохрина, О.И. Обогащение полиметаллических марганецсодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, И.Е. Прошунин, **И.Е. Ходосов** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 309 – 315.

2. Нохрина, О.И. Разработка основ энергоэффективных процессов металлургии с использованием термодинамического моделирования / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, И.А. Рыбенко, **И.Е. Ходосов** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 237 – 244.

3. Нохрина, О.И. Получение металлизированных продуктов с использованием углей Кузбасса / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, **И.Е. Ходосов** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 10. – С. 697 – 703.

Статьи в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях:

1. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., **Hodosov I.E.** // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 6. Сер. «6th International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering». – 2015. – С. 012045.

2. Modern Approaches to Efficient use of Mn-Containing Raw Material in Steel Production / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., **Khodosov I.E.**, Osipova V.G. // В сборнике: Applied Mechanics and Materials. Vol. 770. – 2015. С 8 – 13.

3. Energy-efficient reduction of iron from its ores / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., **Khodosov I.E.** // Steel in Translation. Vol. 46. № 4. – 2016. С 237 – 244.

4. Production and use of concentrates from polymetallic manganese ore / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., **Khodosov I.E.** // Steel in Translation. Vol. 45. № 5. – 2015. С 309 – 315.

5. Manufacturing and Application of Metalized Ore-Coal Pellets in Synthetic Pig Iron Smelting / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Hodosov I.E. // В сборнике: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 142. 2016. С. 012068.

6. A study on the production processes of granulated iron / Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., **Hodosov I.E.** // В сборнике: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150. – 2016. – С. 012003.

Труды периодических изданий и научно-практических конференций:

1. Серебряков, М.В. Использование металлизированных продуктов при выплавке стали / М.В. Серебряков, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конфе-

ренции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией профессора М. В. Темлянцева. – 2014. – С. 74 – 75.

2. **Ходосов, И.Е.** Оценка возможности использования каменных углей Кузбасса для получения металлизированных продуктов / **И.Е. Ходосов**, А.В. Сидоров // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией профессора М. В. Темлянцева. – 2014. – С. 71 – 73.

3. **Ходосов, И.Е.** Получение металлизированных продуктов с использованием каменных углей / **И.Е. Ходосов** // В сб.: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием. – 2014. – С. 40 – 45.

4. **Ходосов, И.Е.** Получение чистого железа путем внедоменной переработки железных руд и углей Кузбасса / **И.Е. Ходосов**, О.И. Нохрина // В сб.: Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации». Материалы Инновационного конвента. – 2014. – С. 378 – 380.

5. Нохрина, О.И. Исследование твердофазного восстановления железа углями Кузбасса / О.И. Нохрина, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Metallurgy: technologies, management, innovations, quality. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. Под ред. Е. В. Протопопова. – 2014. – С. 203 – 207.

6. Рожихина, И.Д. Альтернативные углеродосодержащие материалы в восстановительных процессах получения марганцевых, хромистых сплавов и металлизированного железа / И.Д. Рожихина, Ю.Е. Романенко, П.П. Лазаревский, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Metallurgy: technologies, management, innovations, quality. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. Под ред. Е. В. Протопопова. – 2014. – С. 128 – 134.

7. Нохрина, О.И. Углеродотермическое восстановление железорудного сырья в твердой фазе / О.И. Нохрина, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Наука в современном информационном обществе. Материалы IV международной научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Академический». – 2014. – С. 119.

8. **Ходосов, И.Е.** Переработка железных руд и углей Кузбасса / **И.Е. Ходосов**, О.И. Нохрина // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2015. – № 2. – С. 118 – 121.

9. Рожихина, И.Д. Применение высококачественных материалов – продуктов обогащения полиметаллического марганецсодержащего сырья / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, И.Е. Прошунин, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья. – 2015. – С. 476 – 481.

10. **Ходосов, И.Е.** Металлизация железных руд твердыми углеродистыми восстановителями / **И.Е. Ходосов**, О.И. Нохрина // В сб.: Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья. – 2015. – С. 468 – 471.

11. **Ходосов, И.Е.** Гранулированное железо – инновационное металлургическое сырье / **И.Е. Ходосов**, К.С. Медведева, О.И. Нохрина / В сб.: Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы Инновационного конвента. Департамент молодежной политики и спорта Кемеровской области. Кузбасский технопарк. Совет молодых ученых Кузбасса. – 2015. – С. 360 – 363.

12. Нохрина, О.И. Использование каменных углей при восстановлении железа в твердой фазе / О.И. Нохрина, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт материаловедения и металлургии. Ответственные за выпуск: Н. Н. Озерец, А. С. Жилин. – 2015. – С. 32 – 37.

13. **Ходосов, И.Е.** Внедоменная переработка железных руд и углей Кузбасса / **И.Е. Ходосов**, К.С. Медведева // В сб.: Молодежь и наука: реальность и будущее. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 233 – 236.

14. **Нохрина, О.И.** Исследование процессов получения гранулированного железа / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Под общей редакцией Е. В. Протопопова. – 2015. – С. 22 – 27.

15. **Ходосов, И.Е.** Оптимизация параметров процесса металлизации при углеродотермическом восстановлении железа / **И.Е. Ходосов**, О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина // В сб.: Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XVI Международной конференции. В 2-х ч. Ч. 1. – 2015. – С. 214 – 219.

16. **Ходосов, И.Е.** Моделирование твердофазного восстановления железа каменными углями / **И.Е. Ходосов**, О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, И.А. Рыбенко // В сб.: Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XVI Международной конференции. В 2-х ч. Ч. 1. – 2015. – С. 210 – 214.

17. **Нохрина, О.И.** Получение металлизированных продуктов путем твердофазного восстановления железа с использованием твердых углеродистых восстановителей / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Труды VI Международной научно-практической конференции. Юргинский технологический институт. Ответственный редактор: Д. А. Чинахов. – 2015. – С. 161 – 167.

18. **Ходосов, И.Е.** Получение металлизированных продуктов / **И.Е. Ходосов**, В.И. Долгова, В.В. Разуванов, Р.А. Ходжаев // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией. М. В. Темлянцева. – 2015. – С. 137 – 140.

19. Горохов, А.Д. Применение природных углеродсодержащих материалов для производства металлизированных окатышей / А.Д. Горохов, А.М. Екатериничев, **И.Е. Ходосов**, М.Н. Лазаревская, П.П. Лазаревский // В сб.:

Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М. В. Темлянцева. – 2015. – С. 133 – 136.

20. Медведева, К.С. К вопросу получения железа прямого восстановления / К.С. Медведева, **И.Е. Ходосов** // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М. В. Темлянцева. – 2015. – С. 125 – 129.

21. **Ходосов, И.Е.** Моделирование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд / **И.Е. Ходосов**, К.С. Медведева, О.И. Нохрина // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М. В. Темлянцева. – 2015. – С. 121 – 124.

22. **Ходосов, И.Е.** Применение металлизированных рудоугольных окатышей при выплавке синтетического чугуна / **И.Е. Ходосов** // В сб.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2016. – С. 172 – 174.

Подписано в печать 26.12.2016 г.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ № 736.
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ