

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Рыбенко Инны Анатольевны

на тему: «Развитие теоретических основ и разработка ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации»

на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Актуальность темы. Современная металлургия отличается высокой ресурсо- и энергозатратностью. Одним из возможных направлений снижения энергоемкости и материалоемкости металлургической продукции является совершенствование существующих и создание принципиально новых процессов и технологий, направленных на прямое восстановление металлов, позволяющих получать продукцию с заданными свойствами при одновременном сокращении энергозатрат на производство. Решение этой задачи требует разработки новых методов, методик расчета и соответствующих инструментальных средств, позволяющих осуществлять многовариантные исследования, проводить оптимизацию и значительно снизить время на проектирование технологий. Поэтому научная проблема, направленная на повышение эффективности существующих и разработку новых ресурсосберегающих металлургических технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации, сформулированная в диссертации, является важной и актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. На основе критического анализа известных процессов прямого восстановления, показано, что фактически они не являются прямыми, так как требуют предварительной подготовки сырья и, как правило, включают стадию агломерации. Автором диссертации убедительно показано, что благодаря созданию высокой степени дисперсности рабочей смеси и получения большой реакционной поверхности в струйно-эмульсионном агрегате, происходит резкое ускорение тепломассообменных процессов, создается достаточно совершенная система реагирующих веществ, и при этом с высокой точностью выполняются допущения классической термодинамики, что позволило представить струйно-эмульсионный агрегат как реактор текущего равновесия.

Таким образом, выводы и результаты, полученные в диссертации, основанные на использовании современных методов термодинамического анализа, математического моделирования, оптимизации и подтвержденные сходимостью результатов теоретических исследований с результатами лабораторных и промышленных экспериментов можно считать достаточно обоснованными.

Оценка достоверности и новизны исследования. Научная новизна работы сводится к созданию методов и средств повышения эффективности исследований и их применению при проектировании новых металлургических технологий прямого восстановления металлов:

1. Разработан метод системного решения комплекса взаимосвязанных задач по определению оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и оптимальных режимов ресурсосбе-

регающих металлургических технологий прямого получения металлов в агрегате СЭР и легирования стали с использованием оксидных материалов.

2. Разработана методика термодинамического моделирования для определения оптимальных условий восстановления металлов из оксидных систем, предложены показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и объемлющей системы, в том числе газовой фазы рабочего пространства металлургического агрегата.

3. С использованием термодинамического моделирования получены новые количественные данные и определены:

- оптимальные соотношения компонентов в термодинамических системах $Fe-O-C$, $Fe-O-H-C$, $Fe-Mn-O-C$, обеспечивающие необходимый температурный режим и максимальную степень восстановления металлов;

- оптимальные термодинамические условия и соотношения компонентов в системе $Ti-Fe-C-O-Si-Al$, обеспечивающие полное восстановление железа и перевод высших оксидов титана в низшие без образования карбидов;

- тип, расходы восстановителей и температуры для реализации процессов восстановления никеля и ванадия из оксидов в модельных термодинамических системах.

4. Определены и научно обоснованы оптимальные параметры процессов восстановления никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака, обеспечивающие максимальную степень извлечения металлов.

5. Разработан и реализован в инструментальной системе «Инжиниринг-металлургия» комплекс математических моделей, описывающих взаимосвязь параметров потоков и физико-химических процессов в агрегате струйно-эмульсионного типа, представленном как реактор текущего равновесия.

6. Разработаны теоретические основы новых технологий в агрегате струйно-эмульсионного типа: получения металла из чугуна и окалины; прямого восстановления металла из пылевидных железосодержащих материалов; получения марганцевых сплавов; переработки титано-магнетитовых концентратов; прямого восстановления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа.

Полученные в диссертации результаты являются новыми и достоверными и подтверждаются экспериментальными исследованиями и апробированием технологий в промышленных условиях. Внедрение технологий в производство подтверждается актами и справками о внедрении.

Основные результаты работы опубликованы в 111 печатных работах, в том числе в 17 научных журналах из списка ВАК, в 12 изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, в 4 монографиях, доложены на 50 конференциях, семинарах, совещаниях и конгрессах, подтверждены актами о внедрении. Имеется 1 патент Российской Федерации и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Значимость для науки и практики полученных результатов. Значимость для науки и практики полученных результатов заключается в том, что они являются основой для разработки новых и совершенствования существующих ресурсосберегающих металлургических технологий прямого восстановления металлов. Созданная инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия» в виде комплекса математических моделей, программ и баз дан-

ных позволяет решить широкий круг оптимизационных задач. С использованием инструментальной системы разработаны и апробированы на серии плавок в крупномасштабной опытной установке агрегата струйно-эмульсионного типа оптимальные режимы ресурсосберегающих технологий получения металла из чугуна и окалины, прямого восстановления металла из пылевидных руд и железосодержащих отходов производства, получения марганцевых сплавов и переработки титано-магнетитовых концентратов. Разработаны основы новой технологии прямого восстановления металлов с попутным получением синтез-газа. Определены и апробированы оптимальные режимы ресурсосберегающей технологии прямого легирования стали никелем в дуговых электропечах с использованием никелевого концентрата и разработаны и внедрены в производство оптимальные режимы внепечной обработки стали в ковше и в агрегате «ковш-печь» конвертерным ванадиевым шлаком.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Метод моделирования и оптимизации, методики исследования, математические модели, инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия» и результаты теоретических и лабораторных исследований могут быть использованы:

- при разработке и промышленном апробировании технологий прямого получения металла из железосодержащих материалов на опытной установке агрегата струйно-эмульсионного типа, созданной в кислородно-конвертерном цехе № 2 АО «ЕВРАЗ» ЗСМК;
- при разработке и освоении технологий переработки пылевидных марганцевых руд Селезеньского месторождения и получения марганцевых сплавов на ООО УК «Сибирская горно-металлургическая компания» (СГМК);
- при совершенствовании технологий выплавки стали 08(12)X18H10T с использованием никелевого концентрата в дуговой электропечи на ОАО «Сталь НК» и внепечной обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия», зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (№ 2017617445), также может быть использована в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров.

Анализ содержания диссертации, ее завершенности. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложений и списка литературы из 357 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе проведен литературный анализ по теме исследования. Рассмотрены современные ресурсосберегающие технологии прямого получения металлов, существующие подходы к их моделированию, методики расчета энергетических балансов, методы и инструментальные системы термодинамического моделирования, сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена созданию метода системного решения комплекса взаимосвязанных задач по определению оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и оптимальных технологических режимов процессов прямого восстановления металлов. Подробно рассмотрены этапы метода. В рамках этапа термодинамического моделирования разработаны методика исследования и комплекс показателей, отражающих окислительно-восстановительный потенциал системы. В рамках этапа определения оптимальных технологических режимов процессов прямого восстановления разработаны математические модели для описания взаимосвязи параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате. Математические модели реализованы в виде инструментальной системы «Инжиниринг-металлургия», представляющей собой комплекс программ и баз данных, адаптированных для ряда металлургических технологий, с использованием которой можно проводить многовариантные исследования и решать оптимизационные задачи по различным критериям. Показано, что при реализации этапов разработанного метода осуществляется двухконтурная оптимизация путем решения оптимизационных задач двух видов: нахождение оптимальных условий протекания восстановительных процессов в термодинамических системах и определение оптимальных режимов технологий прямого восстановления металлов.

В третьей главе приведены результаты исследований по определению оптимальных условий протекания восстановительных процессов в модельных системах с использованием методов и средств термодинамического моделирования. Получены оптимальные соотношения компонентов в термодинамических системах $Fe-O-C$, $Fe-O-H-C$, $Fe-Mn-O-C$, обеспечивающие необходимый температурный режим и максимальную степень восстановления металлов; оптимальные термодинамические условия и соотношения компонентов в системе $Ti-Fe-C-O-Si-Al$, обеспечивающие полное восстановление железа и перевод высших оксидов титана в низшие без образования карбидов; тип, расходы восстановителей и температуры для реализации процессов восстановления никеля и ванадия из их оксидов. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры процессов восстановления никеля из никелевого концентрата и ванадия из конвертерного ванадиевого шлака, обеспечивающие максимальную степень извлечения металлов, которые подтверждены экспериментальными исследованиями.

В четвертой главе изложены основные принципы, положенные в основу создания нового непрерывного металлургического процесса СЭР и разработана математическая модель, описывающая на основе фундаментальных законов термодинамики взаимосвязь параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в агрегате струйно-эмульсионного типа, представленном как реактор текущего равновесия.

В пятой главе приведены результаты исследования и оптимизации ряда ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа: получения металла из чугуна и прокатной окалины; прямого восстановления металла из пылевидных руд и железосодержащих техногенных материалов; получения марганцевых сплавов из карбонатных и оксидных руд, переработки титано-магнетитовых концентратов; прямого вос-

становления железа с попутным получением высококалорийного синтез-газа. Показано, что полученные результаты легли в основу при реализации плавов на крупномасштабной опытной установке, на которой была проведена серия экспериментов, подтвердивших преимущества процесса и агрегата струйно-эмульсионного типа и позволивших оценить адекватность моделей.

В шестой главе представлена математическая модель процесса получения стали в дуговой электросталеплавильной печи и раскисления и легирования металла в ковше. Приведены результаты моделирования, оптимизации и апробирования в лабораторных и промышленных условиях технологических режимов прямого легирования металла никелем в электропечи с использованием никелевого концентрата и обработки стали в ковше и на установке «ковш-печь» конвертерным ванадиевым шлаком.

В заключении приведены основные выводы по представленной работе.

В приложении приведены акты о внедрении, справки об использовании результатов диссертационной работы в производственной и образовательной деятельности, свидетельство о государственной регистрации программы «Инжиниринг-металлургия» и представлен пример расчета переработки марганцевых руд в агрегате СЭР.

Корректность изложения научного материала, наглядная иллюстрация полученных результатов в виде таблиц, графиков и структурных схем позволяют объективно оценивать содержание, выводы и значимость проведенных научных исследований. Работа написана технически грамотно, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ и является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на актуальную тему.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

Несомненным достоинством работы является создание комплексного метода и средств повышения эффективности исследований, в том числе инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия», которые позволили осуществить уникальные расчеты и решить ряд взаимосвязанных оптимизационных задач при совершенствовании существующих и разработке принципиально новых металлургических технологий.

Также интерес представляет методика термодинамического моделирования, система термодинамических показателей, отражающие окислительно-восстановительный потенциал не только расплава, но и всей системы и разработанная программа «АвтоАстра», которая позволяет определять равновесные температуры, что является важным при проектировании принципиально новых процессов и агрегатов.

В работе в результате реализации схемы двухконтурной оптимизации решены задачи определения оптимальных условий для восстановления металлов в модельных системах и оптимальных режимов металлургических технологий.

Синергетический подход к управлению процессами позволил создать принципиально новый агрегат струйно-эмульсионного типа, в котором возможно достижение предельно высокого коэффициента использования исходного топлива.

Научно обоснована возможность создания на основе агрегата СЭР комплексных ресурсосберегающих технологий прямого получения металлов, для

которых с использованием разработанных методов и средств определены оптимальные режимы, позволившие повысить эффективность этих технологий. Представлены результаты экспериментальной проверки на крупномасштабной опытной установке, показана реализуемость нескольких вариантов технологий, проведена оценка адекватности моделей.

Основные замечания по диссертации.

1. При математическом описании взаимосвязи параметров потоков и физико-химических процессов в агрегате СЭР не рассматривается такой важный фактор как теплообменные процессы, происходящие как в самом реакторе, так и в рафинирующем отстойнике.

2. В диссертационной работе рассматриваются только статические модели различных металлургических процессов, однако без применения динамических моделей невозможно описать сложные физико-химические процессы, протекающие в металлургических агрегатах.

3. Известно, что принцип максимума энтропии применяется для описания свойств изолированных систем. Однако непонятна правомерность использования этого принципа для описания термодинамических свойств открытых систем, к которым относится агрегат струйно-эмульсионного типа.

4. В диссертации нет количественной связи между параметрами технологических режимов процессов в агрегате СЭР с его конструктивными параметрами.

5. На рис. 5.4 (стр. 194) на графике зависимости энергоемкости процесса от окислительно-восстановительного потенциала газовой фазы Z в агрегате струйно-эмульсионного типа экстремум отсутствует, однако автор утверждает, что оптимальная область находится в диапазоне значений Z от 30 до 50 %.

6. Из диссертации непонятно, каким образом рядовой пользователь может применять инструментальную систему «Инжиниринг-Металлургия» для решения своих практических задач, а также насколько эта система является универсальной.

7. Применение разработанных методов и инструментов моделирования и оптимизации продемонстрировано на небольшом количестве примеров расчета технологических режимов процессов прямого восстановления металлов. Автором не показана возможность использования этих методов и средств для других процессов и технологий.

Указанные замечания не снижают научного уровня работы Рыбенко И.А., они не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, методам исследования, научной новизне и содержанию соответствует паспорту специальности 05.16.02. – Металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», п. 5 «Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов», п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов», п. 20 «Математические модели процессов производства черных, цветных и редких металлов».

Автореферат составлен аргументировано, логично и полностью отражает содержание диссертационной работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
Положением о порядке присуждения ученых степеней**

В целом диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки и практики в области развития металлургического производства.

Таким образом, диссертация Рыбенко Инны Анатольевны «Развитие теоретических основ и разработка ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации» является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема комплексного подхода к моделированию и оптимизации технологических режимов при проектировании ресурсосберегающих технологий, имеющая важное хозяйственное значение, а также изложены новые научно обоснованные технологические решения по совершенствованию технологий прямого легирования металла и разработке принципиально новых малоэнергоёмких металлургических технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Я, Зиятдинов Мансур Хузиахметович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Рыбенко Инны Анатольевны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий СТПОБП «Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета»



Зиятдинов Мансур Хузиахметович

Научная специальность
05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов
Рабочий адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
Тел.: 8-913-854-69-66
e-mail: ziatdinovm@mail.ru



Подпись Зиятдинова М.Х. удостоверяю

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника
Управления делами

М.Б. Удалова

«13» ноября 2018 г.