

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

1 Актуальность темы диссертации

Снижение энергоемкости и материалоемкости металлургического производства сегодня является одной из актуальнейших задач стоящих, как перед отечественной, так и мировой металлургией. В представленной диссертации решение этой актуальной задачи осуществляется в двух направлениях: совершенствование существующих и разработка принципиально новых металлургических технологий. В плане совершенствования существующих следует отметить технологии прямого восстановления металлов из оксидных материалов при легировании стали. Перспективным направлением в ресурсосбережении является создание новых струйно-эмульсионных процессов и агрегатов, для которых характерны большие поверхности взаимодействия фаз и высокие скорости физико-химических взаимодействий. Известно, что при совершенствовании существующих и разработке новых металлургических технологий необходимо проведение достаточно большого количества исследований связанных с протеканием высокотемпературных процессов в сложных термодинамических системах с физико-химическими процессами, как в равновесных, так и в неравновесных условиях. С учетом того, что экспериментальные исследования являются достаточно дорогими, большое значение приобретает вычислительный эксперимент, который позволяет анализировать состояния и процессы и делать выводы о поведении исследуемых объектов на основании модельных представлений. Это говорит о необходимости создания методов и инструментальных систем моделирования, позволяющих осуществлять многовариантные расчеты, проводить исследования и решать оптимизационные задачи.

В связи с этим актуальность представленной диссертационной работы не вызывает сомнений.

2 Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертационное исследование выполнено на достаточно высоком научно-техническом уровне. Автор сосредоточился на аспекте повышения эффективности существующих и разработке новых ресурсосберегающих металлургических технологий с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации, что является основной целью работы.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертации подтверждается:

- тщательным изучением предмета исследования посредством анализа большого числа литературных источников и обобщения исследований отечественных и зарубежных ученых в области разработок новых процессов прямого восстановления, а также моделирования и оптимизации металлургических технологий;
- корректным применением, развитием и адаптацией известных методов и подходов в области математического моделирования и термодинамического анализа;
- результатами экспериментальных исследований предложенных методов и моделей в процессе их программной реализации, тестирования и верификации;
- сходимостью результатов теоретических исследований с результатами лабораторных и промышленных экспериментов.

С учетом вышесказанного, научные положения и выводы диссертационной работы следует считать научно-обоснованными.

3 Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация соответствует поставленной цели, задачам по ее достижению, а также полученным результатам и выводам. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и достоверными. В качестве научных результатов, полученных автором лично, следует отметить:

- метод определения оптимальных условий протекания процессов в термодинамических системах и оптимальных режимов металлургических технологий;
- методику термодинамического моделирования и комплекс показателей, отражающих окислительно-восстановительного потенциал системы;
- математические модели, описывающих взаимосвязь параметров входных-выходных потоков и физико-химических процессов в металлургическом агрегате;
- инструментальную систему «Инжиниринг-Металлургия» для исследования и оптимизации при проектировании металлургических технологий;
- результаты теоретических исследований и оптимизации процессов восстановления металлов в модельных системах;
- результаты термодинамического моделирования и экспериментального исследования процессов восстановления металлов из оксидных систем;
- оптимальные режимы технологий, реализуемых в агрегате струйно-эмульсионного типа.
- технологические основы прямого восстановления железа в агрегате СЭР с получением попутного синтез-газа;
- оптимальные технологические режимы процессов легирования стали никелем в дуговой электропечи и обработки стали в ковше конвертерным ванадиевым шлаком.

Положения научной новизны отражают реализацию предложенных автором метода, методик, оптимальных параметров, технологических режимов и теоретических основ новых технологических процессов металлургического производства. Достоверность научных положений диссертации, теоретических выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением указанных в работе методов исследования и успешным практическим применением результатов диссертационной работы, что отражено в актах о внедрении.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Значимость результатов диссертации для науки и практики определяется прикладным характером проведенных диссертационных исследований, решением ряда научных задач с практическим использованием полученных теоретических результатов и результатов вычислительных экспериментов.

Ценность диссертационных исследований заключается в том, что:

- создана инструментальная система «Инжиниринг-Металлургия» для решения широкого круга оптимизационных задач ряда металлургических технологий;
- разработаны и апробированы оптимальные режимы ресурсосберегающих технологий на серии плавок в крупномасштабной опытной установке агрегата струйно-эмульсионного типа;
- для практического применения разработаны основы новой технологии прямого восстановления металлов с получением синтез-газа;
- определены и апробированы в промышленных условиях оптимальные режимы ресурсосберегающей технологии прямого легирования стали никелем в дуговых электропечах;
- разработаны и внедрены в производство технология и оптимальные режимы внепечной обработки стали на выпуске металла и в агрегате «ковш-печь».

5 Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Учитывая теоретическую и практическую значимость результатов диссертационной работы, рекомендуется их использование для решения широкого круга оптимизационных задач при совершенствовании существующих и разработке принципиально новых металлургических технологий, а также в учебном процессе.

Результаты исследования и оптимизации вариантов ресурсосберегающих металлургических технологий 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 и получения марганцевых сплавов, в том числе, 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), может быть использована при разработке новых и совершенствовании существующих металлургических технологий, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров.

6 Анализ содержания диссертации, ее завершенности

Диссертационная работа выполнена и оформлена на высоком научно-техническом уровне в соответствии с требованиями ВАК РФ. Материал достаточно иллюстрирован, стиль изложения в целом хороший. Текст диссертации изложен на 327 страницах машинописного текста с рисунками и таблицами, содержит введение, 6 глав, заключение, 6 приложений и список литературных источников из 357 наименований.

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

В первой главе приведен литературный анализ по теме исследования, рассмотрены технологии прямого получения металлов, методы и инструментальные системы моделирования, методики расчета и способы решения задач оптимизационных задач. Приведены достижения научных школ в области математического моделирования металлургических процессов. Показаны преимущества струйно-эмульсионных процессов и агрегатов. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе разработан метод системного решения комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению наилучших условий реализации металлургических технологий и путей достижения этих условий. Подробно рассмотрены этапы метода. Предложена методика термодинамического моделирования и показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал системы. Обоснован выбор инструментов расчета и метода оптимизации на этапе термодинамического моделирования. Разработаны математические модели взаимосвязи потоков и параметров процесса в металлургическом агрегате. Приведены принципы реализации моделей в инструментальной системе «Инжиниринг-Металлургия», представляющей собой комплекс программ и баз данных. Осуществлена постановка задачи оптимизации. Описана методика экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты термодинамического моделирования процессов восстановления металлов на примере Fe , Mn , Ti , Ni , V в модельных системах. Определены возможные составы и температуры газовой фазы при горении газообразного, твердого и смешанного топлива. В модельных системах $Fe_2O_3+nC+mO_2$; $Fe_2O_3+kCH_4+nC+mO_2$ и $pFe_2O_3+lMnO+nC+mO_2$ выделены границы областей протекания окислительно-восстановительных реакций, получены количественные зависимости параметров системы от температуры и расхода восстановителя, показана возможность снижения расходных расходов окислителя и восстановителя, необходимых для восстановления железа и достижения заданного

температурного режим. Для системы $TiO_2 + Fe_2O_3 + nC$ определены условия, при которых происходит только восстановление железа и высших оксидов титана без образования его карбида. Определены оптимальные расходы восстановителей в модельных системах $NiO + pFe + nC$ и $V_2O_5 + nC + mSi$, а также при восстановлении никеля углеродом коксика из никелевого концентрата и ванадия кремнием ферросилиция и углеродом коксика из конвертерного ванадиевого шлака. Представлены результаты экспериментальных исследований по изотермической выдержке оксидных материалов с восстановителями, подтверждающие результаты термодинамического моделирования.

В четвертой главе приведены принципы реализации нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа СЭР на основе синергетики и неравновесной термодинамики. Рассмотрена конструкция агрегата и особенности технологии. Показано, что в результате достижения высоких скоростей тепломассообменных процессов, окислительно-восстановительных реакций и фазовых превращений струйно-эмульсионный агрегат можно рассматривать как проточный реактор текущего равновесия, в котором устанавливаются постоянные по времени скорости химических и фазовых превращений, что в стационарном режиме приводит к постоянным значениям параметров и концентраций компонентов в выходном потоке. При этом допущения равновесной термодинамики выполняется с достаточно хорошим приближением, что позволило разработать математическую модель процесса на основе фундаментальных законов термодинамики.

Пятая глава посвящена разработке ресурсосберегающих технологий в агрегате струйно-эмульсионного типа. Проведены исследования и определены оптимальные режимы технологий получения металла из чугуна и прокатной окалины и прямого получения металла из железорудных материалов.

Разработана безотходная технология переработки мелкофракционных карбонатных и оксидных марганцевых руд, в которой для предварительного восстановления марганца из высших оксидов или разложения карбонатов в дополнительном агрегате кипящего слоя предлагается использовать восстановительный газ, являющийся продуктом реализации технологии восстановления марганца в агрегате СЭР. В результате решения задачи оптимизации определены расходы материалов, обеспечивающие согласованный поток вещества и энергии, проходящий через основной агрегат СЭР и подготовительный агрегат кипящего слоя. Приведены примеры расчета для двух типов руд – оксидной и карбонатной.

Также для агрегата СЭР разработана безотходная технология переработки титаномагнетитовых концентратов, обеспечивающая одновременно с выплавкой природнолегированного металла получение товарного титанистого шлака.

С использованием инструментальных средств моделирования разработаны теоретические основы технологии прямого восстановления металла с получением попутного высококалорийного синтез-газа, в которой для коррекции состава технологического газа до параметров кондиционного синтез-газа предлагается совместить пароугольный газификатор с металлургическим агрегатом, что дало возможность создания энергометаллургического процесса, так как технологический газ превращается в товарный продукт.

Технологии по переработке железосодержащих материалов, марганцевых руд и титаномагнетитовых концентратов реализованы в промышленных экспериментах на опытной установке, по результатам которых проведена оценка адекватности моделей.

В шестой главе приведены результаты использования метода и инструмента моделирования и оптимизации для разработки технологий легирования металла с использованием оксидных материалов. Разработана математическая модель процесса получения стали в дуговой электросталеплавильной печи и раскисления и легирования металла в ковше. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению оптимальных технологических режимов легирования стали никелем с использованием никелевого концентрата в дуговой электропечи, обработки стали в ковше на выпуске металла конвертерным ванадиевым шлаком, а в агрегате «ковш-печь» с использованием коксика и ферросилиция. Проведена оценка адекватности моделей.

В заключении приведены обобщающие выводы по работе. В приложении представлены акты и справки об использовании результатов диссертации в производстве и в учебном процес-

се, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и приведен пример расчета в этой программе технологии переработки марганцевых руд в агрегате СЭР.

В целом, диссертация Рыбенко И.А. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Работа логически структурирована, изложена понятно, четко и грамотно. Последовательность изложения материала создает целостное представление о содержании диссертации. По главам и по работе в целом приведены соответствующие выводы, отражающие полученные научные и практические результаты. 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.

7 Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

К достоинствам диссертационной работы следует отнести обоснованную теоретическую и практическую оценку полученных результатов, глубину проработки рассматриваемой предметной области.

Однако в работе имеется ряд недостатков.

Основные замечания по диссертации

1. При выполнении анализа научно-технической литературы автор использовал недостаточно актуальную информацию о введении в эксплуатацию установок прямого восстановления, например достаточно старые данные о АО «ОЭМК», не сказано о запуске на АО «Лебединский ГОК» установок прямого восстановления железа.

2. В анализе научно-технической литературы отсутствует информация о разработанной под руководством профессора Рощина В.Е. общей электронной теории восстановления и окисления металлов.

3. На стр. 61 автор утверждает, что любой металлургический процесс можно представить в виде совокупности следующих стадий и подпроцессов: горение топлива, окисление элементов, восстановление металлов из оксидов, фазовые переходы и растворение элементов, в связи с этим насколько возникает вопрос насколько это утверждение применимо для современных металлургических процессов.

4. На стр. 63 сказано, что окислительные процессы составляют основу сталеплавильных процессов и осуществляются при высоких температурах, поэтому реакции протекают в условиях взаимодействия жидких фаз – металла и шлака, отсюда возникает вопрос, а что газовая фаза не участвует в протекании окислительных процессов.

5. В разделе 2.3.2 не указано, на базе каких основополагающих принципов или концепций были сформированы показатели, отражающие окислительно-восстановительный потенциал термодинамической системы.

6. В разделе 2.3.3 автор делает обоснование и выбор инструментов термодинамического моделирования основываясь на таких системах, как «ТЕРРА» и «АСТРА», однако в главе 1 описано множество систем, чем эти системы хуже, например «HSC Chemistry».

7. На стр. 65 автор говорит о использовании метода термодинамического моделирования, основанного на поиске экстремума термодинамического потенциала, а именно максимума энтропии, однако в разделе 2.4.3 по тексту и на рис. 2.10 о поиске максимума энтропии ничего не сказано. Это требует пояснения.

8. В разделе 2.4.3 не указано, каким образом, в каких случаях и при решении каких задач осуществляется доступ к стандартным модулям «Энтальпии», «Активности», «Реакции», «Оптимизация», «Графика» и «Исследование» в составе инструментальной системы «Инжиниринг-Металлургия».

9. На стр. 78 не приведены пределы суммирования в левой части формулы 2.39.

10. В разделе 3.2 на стр. 105 автор рассматривает вопросы восстановления железа и марганца и говорит о том, что «общее количество веществ для заданной системы в выбранном диапазоне температур составило величину порядка 15 – 25», отсюда возникает вопрос почему «порядка» и какие это вещества.

11. В главе 3 автор проводит термодинамическое моделирование восстановления различных металлов (железо, марганец, никель, ванадий), однако лабораторные исследования про-

водятся только для никеля и ванадия. Кроме того, недостаточно четко выполнено сопоставление теоретически полученных данных с экспериментальными.

12. На стр. 175 не указаны размерности величин в формулах (4.3) – (4.5).

13. На стр. 176 в пояснениях к формуле 4.6 индексы в обозначениях количеств веществ в конденсированном и газообразном входных потоках обозначены русскими буквами «к» в то время, как в формуле они обозначены латинскими буквами.

14. В главе 5 автор говорит о снижении энергоемкости стр. 188, однако из диссертации не ясно, каким образом оценивалась эта величина, и что под ней автор подразумевает. Также непонятно, относительно какого процесса происходит снижение энергоемкости.

15. Необходимо пояснить, почему снижается энергоемкость процесса при протекании восстановительных процессов, ведь они требуют затрат энергии.

16. Из диссертации неясно, каким образом можно обеспечить процесс дефосфорации при переработке карбонатных марганцевых руд Усинского месторождения.

17. По тексту диссертации постоянно происходит замена терминов «металл», «сталь», «чугун», в связи с этим необходимо пояснить каким термином все таки необходимо пользоваться.

Указанные недостатки серьезно не влияют на представленные выводы и результаты.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов, а именно пунктам: 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.

Содержание диссертации в целом соответствует содержанию работ, опубликованных по тематике диссертации. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. На чужие материалы, использованные в диссертации, имеются ссылки. В диссертации определен вклад автора в разработку проблемы в работах, опубликованных коллективно с соавторами. Краткое содержание глав диссертационной работы, основные выводы и результаты представлены в автореферате диссертации, содержание которого достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные положения и результаты проведенных исследований обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

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

На основании анализа диссертации, автореферата и опубликованных автором работ можно сделать вывод о том, что диссертационная работа является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на актуальную тему. Диссертация написана на достаточном научно-техническом уровне, технически грамотно и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Совокупность результатов, полученных лично автором, позволяет квалифицировать ее как докторскую диссертацию. Результаты работы в целом достоверны, выводы и заключения научно обоснованы.

Таким образом, диссертация Рыбенко Инны Анатольевны является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема разработки метода определения оптимальных режимов металлургических технологий путем решения комплекса взаимосвязанных задач, имеющая важное хозяйственное значение, а также изложены новые научно обоснованные технологические решения по реализации принципиально новых ресурсосберегающих технологий прямого получения металлов, 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 – «Metallургия черных, цветных и редких металлов».

Я, Кожухов Алексей Александрович, 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, доцент,
заведующий кафедрой металлургии
и металловедения им. С.П. Угарова
Старооскольского технологического
института им. А.А. Угарова (филиал)
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»



Кожухов Алексей Александрович

Научная специальность
05.16.02 – Металлургия черных и редких металлов

Рабочий адрес: 309516, г. Старый Оскол, Белгородской области,
микрорайон им. Макаренко, 42.

Тел.: 8-910 328 70 62

E-mail: kosuhov@yandex.ru

« 5 » 12 2018 г.

Подпись Кожухова А.А. удостоверяю



НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ
ПЕРМИНОВА О.В.