

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича, «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродосодержащими материалами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

Тема диссертации С.А. Макеева несомненно актуальна, поскольку она направлена на решение важной задачи по повышению эффективности восстановления железа из оксидов, содержащихся как в рудных материалах так и в отходах металлургических производств за счет совершенствования способов управления процессами жидкофазного восстановления.

В процессе выполнения этой работы автор получил ряд новых результатов. В частности им теоретически и экспериментально показано, что в шлаковом расплаве, при температурах ниже температуры разложения чистого гематита, происходит его частичная диссоциация, при этом доля образующегося двухвалентного железа значительно меньше, чем при разложении гематита до магнетита; установлен механизм жидкофазного восстановления оксидов железа и формирования чугуна в шлаковом расплаве; жидкофазное восстановление до металлического возможно только после практически полного перехода ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в ( $\text{FeO}$ ); дано объяснение зависимости производительности печи Ромелт от соотношения оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ) в перерабатываемом сырье.

В своих исследованиях автор использовал современные физико-химические методы – оптическую и электронную микроскопию, методы анализа химического состава, физических и теплофизических свойств материалов, а также термодинамическое моделирование с использованием специального расчетного модуля, совместимого с программным комплексом ИВАНТЕРМО, что позволило получить достоверные и обоснованные результаты.

Следует отметить, что проведенные исследования и полученные в работе закономерности позволили разработать механизмы управления процессом жидкофазного восстановления применительно к печи Ромелт и оформить заявку на патент.

Важно также подчеркнуть, что для переработки высокоокисленного железорудного сырья автором разработана технология и предложен новый «дуплекс-процесс Ромелт», состоящий из двух печей.

По работе есть замечания:

1. В экспериментальной части автореферата отсутствуют исследования относительно сопоставительного анализа использования в качестве сырья оксидов железа содержащихся как в рудных материалах так и отходах металлургического производства (окалина, пыль газоочистки, шламы).

Высказанные замечания не уменьшают значимости диссертационной работы, выполненной на хорошем научно-техническом уровне, поскольку не затрагивают основных ее положений.

В целом, диссертационная работа, «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродосодержащими материалами» соответствует шифру специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов» (пункты 4, 7) и критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Макеев Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

Главный металлург  
Центра перспективного технического развития  
АО «ОМК», К.т.н.



Андрей Михайлович Ламухин

г. Москва, 115184, Озерковская наб., д. 28, стр. 2.

e-mail: [Alamuhin@omk.ru](mailto:Alamuhin@omk.ru)

тел. 8(495) 231-77-65 (доб. 26-00)



## Отзыв

на автореферат диссертации Макеева С.А.

«Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Рецензируемая работа направлена на изучение особенностей и совершенствование технологии жидкофазного восстановления оксидов железа твердым углеродом применительно, в первую очередь, к технологии Ромелт.

Показано, что на параметры процесса существенное влияние оказывает минералогический состав загружаемых железосодержащих материалов; присутствие в шихте высших оксидов железа тормозит скорость реакции восстановления, и, следовательно, отрицательно влияет на показатели процесса.

Этот тезис подтверждают теоретические и экспериментальные исследования, проведенные автором диссертации.

Следует отметить, что это обстоятельство не учитывалось ранее разработчиками технологии Ромелт.

В работе даны конкретные рекомендации, позволяющие избежать отрицательного влияния высших оксидов железа на параметры процесса.

Работа выполнена на актуальную тему, ее выводы могут найти применение при пуске строящегося завода по технологии Ромелт в Республике Союз Мьянма.

При общей положительной оценке работы следует отметить:

1. Из автореферата не ясно, при каком содержании высших оксидов железа в шихте автор рекомендует переход на двухступенчатую технологию плавки.
2. Автор рекомендует при плавке процессом Ромелт вести постоянный контроль за содержанием FeO в шлаке. На настоящий момент отсутствует технология оперативного определения этого соединения в шлаке.

В целом следует отметить, что рецензируемая работа выполнена на актуальную тему, содержит элементы новизны, промышленной полезности и соответствует требованиям ВАК для кандидатских диссертаций.

Автор диссертационной работы Макеев Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02.

Доктор технических наук,  
Первый Вице-Президент  
Группы компаний «МетПром»



С.Е.Лазуткин

## ОТЗЫВ

на автореферат Макеева Сергея Александровича

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Работа С.А. Макеева посвящена исследованию поведения оксидов железа в шлаковом расплаве, их взаимодействия с углеродом, которые нашли практическое применение для технологических расчетов параметров процесса Ромелт. Учитывая прикладное значение решаемой задачи, ее актуальность не вызывает сомнений.

В процессе выполнения работы автору удалось решить несколько важных научных задач, в частности, были изучены особенности диссоциации гематита в шлаковом расплаве, выявлены особенности жидкофазного восстановления двух- и трехвалентного оксида железа из шлака, исследовано влияние свойств углеродсодержащих материалов на восстановление оксидов железа из шлака. На основании проведенных исследований автору удалось разработать рекомендации и новые схемы переработки железосодержащего сырья на базе технологии жидкофазного восстановления Ромелт. Автору удалось объяснить зависимость производительности печи Ромелт от соотношения оксидов железа в перерабатываемом сырье. Практическая значимость работы подтверждается тремя полученными патентами на способы производства чугуна на базе технологии Ромелт.

Структура работы является вполне логичной. Приводится обзор современных и перспективных технологий жидкофазного восстановления, сформулированы цели и задачи исследования, приводятся результаты термодинамического моделирования (ТДМ), и экспериментального изучения диссоциации гематита при его растворении в шлаке, а также результаты ТДМ и экспериментального изучения особенностей жидкофазного восстановления оксидов двух- и трехвалентного железа из шлакового расплава углеродсодержащими материалами. Представлены результаты экспериментального исследования жидкофазного восстановления коксовыми остатками углей и предложения по совершенствованию технологии Ромелт. Сочетание теоретических (термодинамических) расчетов и экспериментального изучения рассмотренных вопросов, безусловно, является достоинством работы.

К сожалению, из материалов автореферата нельзя судить, насколько правомерно сравнение полученных экспериментальных данных по диссоциации гематита в шлаке с равновесными значениями, полученными в термодинамических расчетах. К недостаткам работы можно отнести и применение несистемных единиц давления (атм.), стр.9 и далее.

В целом работа выполнена на высоком научном уровне, соответствует критериям ВАК и ее автор Макеев Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидат технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Белов Г.В., д.т.н., в.н.с.

лаборатории химической термодинамики

кафедры физической химии Химического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова

[gbelov@yandex.ru](mailto:gbelov@yandex.ru)



119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1, МГУ, химический факультет





## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродосодержащими материалами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

Диссертация Макеева С.А. касается одного из актуальных направлений металлургии – развитию и разработке альтернативных процессов производства чугуна без использования кокса, основанных на процессах восстановления оксидов железа в жидкой шлаковой ванне, в частности процессу Ромелт. Основной целью данной работы было выявление и объяснение факторов, ухудшающих показатели плавки в печи Ромелт при работе на железорудном сырье высокой степени окисленности, разработке предложений по совершенствованию этой технологии.

В работе приведен анализ современных альтернативных технологий и агрегатов, представлений о механизмах жидкофазного восстановления, проанализированы опытно-промышленные испытания на печи Ромелт на НЛМК. Рассмотрены особенности диссоциации гематита руды в шлаковом расплаве и влияние на этот процесс температуры, давления и общей концентрации железа в шлаке. Теоретически и экспериментально обосновано и дано объяснение снижению производительности печи Ромелт НЛМК при работе на аглоруде. Показано, что переработка сырья на основе трехвалентного железа по известной классической технологии Ромелт затруднена, присутствие трехвалентного оксида в шлаковом расплаве существенно отражается на кинетике процесса.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по моделированию жидкофазного восстановления оксидов железа различного вида. Исследования выполнены с использованием современных методов, позволяющих получать достоверные результаты.

Проведенные исследования и полученные результаты являются оригинальными, и послужили основой для разработки патентов в направлении совершенствования технологии Ромелт, в том числе разработки технологии «дуплекс-процесса Ромелт». Представлен ряд удачных практических рекомендаций применительно к промышленным агрегатам жидкофазного восстановления касающихся ограничения использования углей содержащих сульфиды железа в виде пирита и контроля валентного состояния железа в расплаве в ходе плавки.

Следует отметить, что результаты работы уже находят применение при разработке технических и коммерческих предложений, разработке ТЭО для ряда специфических рудных месторождений.

Тем не менее, по автореферату диссертации есть следующие вопросы и замечания:

- несмотря на выполненные совместно с проектными организациями проработки и предложения, в работе не приведены данные технико-экономической оценки рекомендуемых новых технических решений;
- отсутствуют конкретные рекомендации по критериям, на основании которых следует говорить о предпочтительности использования «дуплекс» процесса Ромелт вместо его известной модификации.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки рецензируемой работы, которая актуальна, выполнена на хорошем научно-техническом уровне и, в целом, соответствует требованиям к кандидатским диссертациям по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов», а ее автор, С.А. Макеев, заслуживает присуждени ему ученой степени кандидата технических наук.

Директор по производству  
ОАО «Ленгипромез»

М.О.Козлович

Начальник металлургического  
отдела, кандидат технических наук

А.В.Лычев





## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макеева С.А. на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами»

Работа затрагивает важный аспект технологии жидкофазного восстановления в оксидном растворе – технологии, которая была разработана и реализована учёными Института стали и сплавов под руководством профессора Роменца В.А.

Несмотря на то, что с начала периода интенсивных исследований в этой области прошло уже достаточно много времени, фактически более 30 лет, обращение к данной тематике указывает на недостаточную изученность закономерностей и особенностей восстановления оксидов железа в высокотемпературной системе, в которой отдельные фазы: газовая фаза, жидкий металл, жидкий оксидный раствор и твёрдые частицы углеродсодержащего материала находятся в непрерывном динамическом и химическом взаимодействии.

Кроме того, с жидкофазным восстановлением, в той или иной степени, мы имеем дело практически во всех современных металлургических процессах, протекающих, например, в электропечах, при подаче на поверхность насыщенной оксидами железа шлаковой фазе, углеродсодержащих фракционированных материалов.

В этой связи, работа является актуальной.

Форма существования и закономерности поведения при взаимодействии с восстановителем катионов железа в жидком оксидном растворе изучена далеко недостаточно. Это обусловлено не только тем, что катионы двух- и трёхвалентного железа могут взаимодействовать друг с другом при определённых условиях, меняя степень окисления, но и по-разному взаимодействовать с другими компонентами оксидного раствора. Сложность даже термодинамической оценки вкладов от восстановления железа, находящегося в оксидном растворе в форме катионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  велика и ещё более возрастает при оценке скоростей соответствующих реакций. Очевидно, что соотношение концентраций данных катионов зависит и от состава оксидного раствора, состава газовой фазы, её восстановительного (окислительного) потенциала, концентрации и площади поверхности твёрдого восстановителя.

Для оценки восстановления железа из окисленного состояния в оксидном растворе до элементарного железа, автор использует метод термодинамического моделирования в предположении, что все оксидные компоненты, формирующие шлаковую фазу, образуют совершенный оксидный раствор. Установлено, что восстановление железа до нулевой степени окисления возможно только после протекания процесса восстановления железа из степени окисления +3 до степени окисления +2.

Влияние концентрации оксида железа (III) на общую скорость восстановления оценивали количественно, обрабатывая результаты экспериментов, полученных на высокотемпературной лабораторной установке. В синтезированных оксидных растворах фиксировали заданную концентрацию катионов 2-х и 3-х валентного железа. Кинетические условия эксперимента регулировали заданной скоростью перемешивания расплава с помощью вращающегося огнеупорного штока. Углеродсодержащий восстановитель подавали на поверхность расплава.

В результате лабораторного эксперимента показано, что наличие катионов  $\text{Fe}^{3+}$  в расплаве приводит к существенному снижению общей скорости восстановления окисленного железа.

Кроме того, сравнивая кинетические кривые восстановления при использовании различных марок угля, автор приходит к заключению, что их восстановительная способность определяется зольностью и концентрацией серы.

Применяя более тонкие методы анализа углеродсодержащих материалов, установлено, что в зольной части применяемых углей, сера содержится в виде пирита  $\text{FeS}_2$  и в виде гипса. В дальнейшем, при термическом воздействии, происходит растворение  $\text{CaS}$  в оксидном растворе, а сульфид железа в виде  $\text{FeS}$  – в каплях первичного металла.

Указанные результаты составляют научную новизну представленной диссертационной работы.

Вместе с тем, по изложенному в автореферате тексту имеется ряд замечаний.

1. На стр. 10 автореферата, автор констатирует: «Шлак является «нейтральным» растворителем для  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , поэтому, все его компоненты можно заменить любым соединением, которое не взаимодействует с оксидами железа. Таким шлакообразующим веществом было выбрано  $\text{SiO}_2$ ». Не ясно, о каком взаимодействии говорит автор. Ведь именно с диоксидом кремния оксиды железа взаимодействуют по-разному.

2. На стр. 12 автореферата автор указывает: «Все расчёты выполнены для давления 1 атм и температуры 1450 °С». Не понятно, учитывалось ли в расчётах, наличие собственно жидкой оксидной фазы.

3. На стр. 20 автореферата автор сообщает, что: «Сера в железе является поверхностно-активным элементом и, блокируя поверхность капель металла, препятствует развитию восстановления (2) и рекомбинации (5) растворённым углеродом ...». Не ясно, каким образом, реализуется указанное препятствие для протекания процесса (2)  $(\text{FeO}) + [\text{C}] = [\text{Fe}] + \text{CO}$ .

Сформулированные замечания не оказывают решающего влияния на общую положительную оценку представленной работы.

Работа выполнена по актуальной тематике, содержит конкретные научные результаты, представлена в законченной логичной форме, изложена грамотным языком и полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК для данных диссертационных работ.

Автор заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата технических наук.

Заместитель Генерального директора  
ООО «ОгнеупорТрейдГрупп», к.т.н.

С.К. Вильданов

Подпись С.К. Вильданова заверяю.  
Генеральный директор  
ООО «ОгнеупорТрейдГрупп»

А.В. Лиходиевский





## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Макеева Сергея Александровича «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Процессы жидкофазного получения чугуна постепенно развиваются и занимают определенную нишу в области производства первичного металла. Жидкофазные процессы уже сейчас могут рассматриваться в качестве альтернативной технологии для переработки текущих и накопленных железосодержащих отходов. Именно в этом направлении наиболее удачно проявил себя процесс жидкофазного получения чугуна Ромелт на Новолипецком комбинате, где в течение 14 лет работала пилотная печь Ромелт. Для дальнейшего развития технологии необходимы углубленные исследования физико-химии процесса восстановления оксидов железа, которые были проведены в настоящей работе.

Анализ плавок, проведенных на пилотной печи, позволил автору выявить влияние соотношения  $\text{Fe(III)/Fe(II)}$  в шихтовых материалах на производительность печи по чугуну, провести термодинамическое моделирование стадийного восстановления оксидов и проверить выявленные закономерности экспериментально в лабораторных условиях. Выполненные исследования для однофазных расплавов составляют научную новизну диссертации, а вывод о возможности восстановления железа только из шлаков, содержащих  $\text{FeO}$ , является основополагающим для практического применения процесса. Новыми являются исследования диссоциации гематита в расплаве и определение доли образующегося двухвалентного оксида железа, ее зависимости от температуры, общей концентрации железа и избыточного давления в газовых пузырьках.

Развитие и выявление особенностей технологии Ромелт, в частности поведение в шлаковых расплавах оксидов железа, механизма и стадий восстановления, позволяет установить границы ее применимости, очертить круг возможных углеродных восстановителей и приоритетных железосодержащих материалов, что является важным при внедрении технологии в практику. Соискателем установлены показатели углей, по которым следует избегать применение определенных видов углей в технологии Ромелт, что является существенным практическим выводом.

Наиболее значимы для практического применения являются и предложенные новые решения по модернизации технологии Ромелт для переработки высокоокисленного сырья, особенно использование пылеугольного топлива, применение которого без больших осложнений может быть внедрено для печи Ромелт.

Автореферат диссертации оформлен с соблюдением государственных стандартов, изложен грамотным языком. Вместе с тем по содержанию автореферата имеются следующие замечания:

- автором отмечены выполненные с учетом результатов диссертации предпроектные работы для ряда металлургических предприятий, в частности применение дуплекс-процесса Ромелт, однако не приведены технико-экономические расчеты, которые являются основным показателем при внедрении технологии;
- отсутствуют рекомендации по возможности переработки железосодержащих отходов металлургических комбинатов технологией Ромелт с учетом выводов диссертационной работы.

Отмеченные недостатки не снижают общий уровень работы, которая соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор - Макеев Сергей Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Руководитель проектов  
Дирекции проектного управления  
ПАО «НЛМК», к.т.н.



А.И. Кононов

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации МАКЕЕВА Сергея Александровича «*Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами*», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Работа посвящена исследованию особенностей восстановительных процессов в новейшем способе бескоксовой металлургии – процессе Ромелт и ее актуальность определяется неизученностью отдельных частных деталей процесса.

Известный из практики компаний опытно-промышленной печи ПЖВ (процесс Ромелт) факт низкой производительности процесса на окисленных железных рудах не находил достаточного обоснования. Представленная работа восполняет этот пробел.

Научная ценность работы заключена в термодинамическом и кинетическом исследовании поведения трехвалентного оксида железа в шлаковом расплаве в процессе восстановления. Показана возможность диссоциации гематита в шлаке при температурах ниже температуры разложения гематита с ограниченным развитием в условиях, характерных для процесса Ромелт. Исследованы в качестве восстановителей различные виды углей, имеющих промышленное значение.

На основе полученных результатов предложено техническое решение, повышающее эффективность использования углерода в процесса Ромелт (вдувание пылеугольного топлива через фурмы нижнего ряда).

Представленная работа несвободна от некоторых замечаний:

- требуют проверки сведения таблицы 1 (несоответствие средних содержаний и общего содержания железа, равно как и диапазонов изменения отношений  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ );
- не обоснован выбор (вне связи с информацией таблицы 1) содержания  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  в шлаке для термодинамического моделирования диссоциации гематита;
- для оценки восстановления также выбрана система, не отвечающая условиям таблицы 1;
- вывод о возможности восстановления до металлического железа только после полного завершения восстановления гематита до вюстита на основании термодинамического моделирования не строг (рис. 1), т.к. в системе недостаточно углерода;
- отсутствуют рис., иллюстрирующие результаты моделей 2 и 3 из таблицы 2 (особенно модели 3, где восстановителем выступает CO);
- выбор для экспериментальных работ активных углей (при том, что в термодинамическом моделировании был рассмотрен только малоактивный графит), а также содержание вносимого углерода (более 10%) не обоснован;
- довольно спорно заключение (в отсутствие характеристики реакционной способности углей) относительно того, что «восстановительная способность углей четко коррелирует с их зольностью и содержанием серы» (с. 17);
- не вполне доказательно предложение о дуплекс-процессе Ромелт в отсутствие экономической оценки.



Высказанные замечания носят дискуссионный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа С. А. Макеева в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Главный эколог ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»,  
проф., д.т.н. *Чижикова*

В.М. Чижикова

12.04.2018 г.

Подпись В.М. Чижиковой заверяю:

*Сек. Соколова Ю.А.*  
*Видеозапись*



## **О Т З Ы В**

**на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича  
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОФАЗНОГО  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМИ  
МАТЕРИАЛАМИ», представленной на соискание учёной степени  
кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия  
чёрных, цветных и редких металлов»**

Актуальность темы выполненного исследования не вызывает сомнений, так как она связана с повышением эффективности переработки гематитовых, лимонитовых и других железосодержащих руд по безкоксовой технологии. Это позволяет отнести данное исследование к приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – Рациональное природопользование (код 06). Понятно, что реализация данного подхода требует разработки научно обоснованных технических решений, обеспечивающих эффективное жидкофазное восстановление оксидов железа и высокое извлечение металла.

Диссертация имеет общепринятую структуру научной работы, соответствующую стандартам на проведение научных исследований и представление их результатов. Основные разделы диссертации посвящены анализу источников, термодинамическому моделированию, экспериментальной проверке и условий восстановления железа из шлаковых расплавов, исследованию жидкофазного восстановления коксовыми остатками углей применительно к процессу Ромелт. Достоверность и обоснованность изложенных материалов подтверждается применением современной базы термодинамических данных ТСИВ ИВТАНТЕРМО и соответствующими экспериментальными исследованиями с использованием аттестованных методик и аккредитованных лабораторий. Текст автореферата в целом отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ.

По тексту автореферата имеются следующие вопросы:

1. Каким критерием оценивается хорошее согласование теоретических и экспериментальных данных (рис. 1)?
2. Какими способами можно контролировать валентное состояние железа в шлаке (стр.20)?
3. Какая предполагаемая экономическая эффективность «дуплекс-процесс Ромелт»?

В целом автореферат даёт достаточно полное представление о диссертации как законченной научно-исследовательской работе, содержащей необходимые квалификационные признаки, а значительное количество опубликованных работ, включая 3 патента на изобретение, говорит о широкой апробации результатов, их научной и технической новизне. Диссертация Макеева Сергея Александровича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технологические решения и



разработки по повышению эффективности Ромелт-процесса за счёт двухзонного восстановления оксидов железа (дуплекс процесс-Ромелт), корректировки общего содержания железа в шлаке и его валентного состояния, ограничения использования углей по фракции и составу, имеющие существенное значение для развития черной металлургии, что в полной мере соответствует п. 9 Положения «О порядке присуждения учёных степеней» ВАК Минобрнауки России, а её автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - Металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

Доцент кафедры  
металлургии, к.т.н.



Коновалов Георгий Владимирович

Заведующий кафедрой  
металлургии, д.т.н.



Бричкин Вячеслав Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»  
Адрес: 199106, Санкт-Петербург, 21 линия, дом 2.  
Телефон: 8(812) 328-84-59;  
адрес электронной почты: Konovalov\_GV@pers.spmi.ru



Г.В. Коновалов, В.Н. Бричкин

Заведующий  
отдела



Е.Р. Яновицкая

10 " 05 20 18 г.

## Отзыв

на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича  
“Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами”, представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Представленная к защите диссертационная работа, посвящена изучению физико-химических основ жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами и разработке практических рекомендаций по усовершенствованию технологии Ромелт.

Актуальность диссертационной работы состоит в изучении влияния соотношения оксидов двух- и трехвалентного железа в шихте на процессы восстановления, в исследовании взаимодействия оксидов железа с углеродом и их поведения в шлаковом расплаве, в практическом применении полученных результатов для технологии Ромелт

Решение сложных физико-химических задач по изучению термодинамических закономерностей диссоциации гематита в агрегатах с жидкофазным восстановлением в диссертационной работе выполнено методами термодинамического моделирования и дополнено экспериментальными исследованиями. Экспериментальные данные подтверждают закономерности, полученные в результате теоретических расчетов (рис. 1, стр.11).

Методами термодинамического моделирования жидкофазного восстановления оксидов железа и формирования чугуна в шлаковом расплаве с учетом удаления из реакционной зоны газообразных продуктов автором получены важные научные результаты и установлено, что жидкофазное восстановление до металлического железа возможно только после практически полного перехода  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в  $\text{FeO}$ . Результаты экспериментальных исследований показали, что жидкофазное восстановление железа из шлака с доминированием трехвалентного железа протекает медленнее, чем из шлака с двухвалентным железом, при этом восстановлению до металлического железа и формированию чугуна предшествует стадия восстановления трехвалентного железа до двухвалентного (рис. 2,3; стр.14).

В представленной диссертационной работе по результатам выполненных исследований автором предложено использовать отдельные агрегаты предварительного восстановления (до  $\text{Fe}^{2+}$ ) и окончательного восстановления железа и формирования чугуна. Важным практическим результатом является также рекомендованное автором технологическое решение по отсеvu мелких фракций угля с последующей их подготовкой и вдуванием в объем шлаковой ванны.

Таким образом, анализ представленных в автореферате результатов показал, что выполненная диссертационная работа является актуальной, содержит элементы научной новизны (стр. 4) и практическую ценность. Это подтверждено основными результатами исследований, опубликованными в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе, входящих в



международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science(стр.22-23), а также прошедших апробацию на международных научных конференциях (стр.4-5).

По автореферату следует отметить следующие замечания:

1. В первом пункте положений научной новизны (стр.4) следует указать значение доли образующего двухвалентного железа при диссоциации гематита по сравнению с разложением гематита до магнетита.
2. По второму пункту научной новизны (стр.4) термодинамическое моделирование не может быть положением научной новизны.
3. По четвертому пункту научной новизны (стр.4) автору следовало бы конкретизировать зависимость производительности печи Ромелт от соотношения оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ) в перерабатываемом сырье.

В целом диссертационная работа содержит новые научные и практические результаты, с помощью которых решена важная научно-прикладная задача выявления особенностей жидкофазного восстановления двух- и трехвалентного оксидов железа из шлака, разработаны рекомендации и новые схемы переработки железосодержащего сырья на базе технологии жидкофазного восстановления процесса Ромелт.

Представленная диссертационная работа соответствует квалификационным требованиям ВАК РФ, а ее автор Макеев Сергей Александрович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Д.т.н., профессор кафедры  
«Технологические машины и  
оборудование»

Ванюкова Наталия  
Дмитриевна

Д.т.н., профессор,  
проректор ФГБОУ ВО «Северо-  
Кавказский горно-металлургический  
институт» (государственный  
технологический университет)

Выскребенец Александр  
Степанович

Подпись проф. Вискребенца А.С.  
и проф. Ванюковой Н.Д.  
удостоверяю



Базеева Лурин  
Михайловна

Ученый секретарь

Ученого совета

ФГБОУ ВО «СКТМ(ГТУ)»

контактный тел. +7(969)675-57-89

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича **«Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Проблемы поиска путей совершенствование плавления и восстановления железорудного сырья были и остаются в настоящее время актуальными и своевременными. Примером этого может служить рецензируемая диссертационная работа С.А. Макеева.

Среди всего многообразия задач, поставленных перед собой диссертантом, выбранный им подход – исследование закономерностей физико-химического взаимодействия углеродсодержащих материалов с железистыми шлаками, обладает существенными преимуществами по эффективности и перспективности при разработке технологий жидкофазного получения чугуна.

Научная новизна и практическая значимость работы в реферате сформулированы достаточно развернуто. Материалы диссертации полностью раскрывают сформулированные положения. Достоверность теоретических посылок подтверждается практическими данными. Перспективность предложенной технологии переработки окисленного железорудного сырья подкреплена полученным патентом Российской Федерации.

Достижением диссертанта следует считать разработку модели восстановления оксидов железа в шлаке, использование которой позволяет осуществлять контроль валентного состояния железа в расплаве.

По автореферату диссертации имеется замечание:

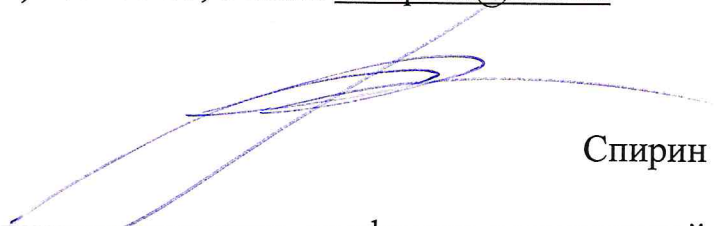
1. В автореферате отсутствует описание требуемого оборудования для реализации предложений диссертанта по совершенствованию технологии жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами для процесса Ромелт.
2. В автореферате отсутствует описание требуемого оборудования для реализации предложений диссертанта по совершенствованию технологии жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами для процесса Ромелт.

Отмеченные замечания не снижают актуальности и целостности теоретических и экспериментальных исследований, выполненных диссертантом на достаточно высоком научном уровне.



Диссертационная работа Макеева Сергея Александровича «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами» соответствует требованиям п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина», профессор  
Тел. (343) 375-48-15, e-mail: [n.a.spirin@urfu.ru](mailto:n.a.spirin@urfu.ru)



Спирин Николай Александрович

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина»  
Тел./факс: +7 (343) 375-44-51, e-mail: [yury-y@planet-a.ru](mailto:yury-y@planet-a.ru)



Ярошенко Юрий Гаврилович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет»  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 28  
E-mail: [rector@urfu.ru](mailto:rector@urfu.ru)  
Тел./факс: +7 (343) 375-44-39

Подпись  
заверяю



11 мая 2018 года

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Макеева Сергея Александровича «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему. Является трудом, направленным на развитие процесса Ромелт (название получено при коммерциализации) – первого в мире опробованного в промышленном масштабе высокотемпературного жидкофазного процесса, исключая применение кокса для выплавки чугуна, необходимости окускования железорудного сырья, позволяющего перерабатывать текущие и накопленные техногенные отходы. В настоящее время на металлургических предприятиях России происходит накопление техногенных отходов, содержащих железо. Полная их утилизация возможна при соответствующем уровне развития технологии переработки, которая на сегодняшний день нуждается в совершенствовании. Решение данной проблемы позволит полнее использовать железо, повысить технико-экономические показатели производства и улучшить экологическую обстановку вблизи металлургических предприятий.

На основе выполненных диссертантом теоретических и экспериментальных исследований, дающих достоверный результат, предложены технологические разработки по совершенствованию процесса Ромелт:

- использовать отдельные агрегаты предварительного восстановления (до  $\text{Fe}^{2+}$ ) и окончательного восстановления железа с формированием чугуна для переработки окисленного железорудного сырья на основе трёхвалентного железа (дуплекс-процессом);
- проводить отсев мелких фракций с последующей их подготовкой и вдуванием в объём шлаковой ванны;
- ограничивать применение углей, содержащих сульфиды железа;
- контролировать валентное состояние железа при управлении процессом.

Целесообразность деления процесса на стадии согласуется с ранее выполненными исследованиями (например, Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы. М.: металлургия, 1986. 136 с.), инициатором которого был Доброхотов Н.Н. (в 30-х годах XIX века).

Важными достоинствами диссертационной работы являются также системный подход и выявление внутренних механизмов жидкофазного восстановления оксидов железа. Весьма существенна апробация её.

Значительны не только практические, но и теоретические результаты исследований. Они могут быть использованы при совершенствовании теории и технологии производства чугуна и стали на многих металлургических предприятиях. Жидкофазное восстановление получает частичное развитие и в доменной печи.

Работу целесообразно использовать при подготовке обучающихся в аспирантуре, магистратуре и бакалавриате – получающих высшее образование по направлениям: 22.03.02–Metallургия, 22.04.02–Metallургия, 22.06.01–Технологии материалов.


Наряду с достоинствами диссертации можно обсудить следующие замечания:

1. Не отражено ионное строение расплавов.
2. Научная новизна в автореферате (стр. 4) не содержит цифровую информацию.



Рассмотрение автореферата позволяет считать, что Макеев Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Сибгатуллин  
Салават Камирович

 Харченко  
Александр Сергеевич

 Дружков  
Виталий Гаврилович

