

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ (ФАНО РОССИИ)  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки

ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ  
им. А.А. Байкова  
Российской академии наук  
(ИМЕТ РАН)

119334, Москва, Ленинский пр., 49  
Тел. (499) 135-20-60, 135-86-11; факс: 135-86-80  
E-mail: [imet@imet.ac.ru](mailto:imet@imet.ac.ru) <http://www.imet.ac.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»  
Зам. директора ИМЕТ РАН  
чл.-корр.  А.Г. Колмаков  
«25» апреля 2018 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Существующие технологии внедоменного производства чугуна, основанные на процессах жидкофазного восстановления железа, не получили широкого распространения. Это связано с тем, что процессы восстановления в жидкой шлаковой ванне изучены не полностью, в особенности влияние соотношения двух и трёхвалентного железа в шлаке. В случае процесса Ромелт особый интерес представляет переработка гематитовых, лимонитовых и других железорудных материалов, в составе которых преобладает трёхвалентное железо. В связи с этим **актуальность диссертационной работы** Макеева Сергея Александровича не вызывает сомнений, так как она посвящена теоретическому и экспериментальному изучению взаимодействия твёрдых углеродсодержащих материалов с железистыми шлаками, имеющими различное соотношение двух и трёхвалентного железа, работа имеет важное практическое значения для совершенствования технологии Ромелт.

### Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка использованных источников из 126 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 18 формул и 16 рисунков.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов исследований.

**В первой главе** приведён обзор современных технологий жидкофазного восстановления железа, рассмотрен механизм процесса и факторы, влияющие на него (характеристики углеродного восстановителя, температура, состав и свойства шлаковых расплавов и т.д.). Представлен обобщённый анализ производственных данных различных компаний на опытно-промышленной печи Ромелт (НЛМК), показывающий влияние соотношения двух и трёхвалентного железа на производительность процесса.

**Во второй главе** приведены результаты термодинамического моделирования и экспериментального изучения в лабораторных условиях диссоциации гематита при его растворении в шлаке. Показано, что при температурах и концентрациях железа в шлаке, характерных для процесса Ромелт, возможна частичная диссоциация гематита, и при этом доля двухвалентного железа не превышает 10-15%.

**В третьей главе** представлены результаты термодинамического моделирования и экспериментального изучения особенностей жидкофазного восстановления двух и трёхвалентного железа из шлакового расплава различными углеродсодержащими материалами. Показано, что жидкофазное восстановление железа становится возможным только при полном предварительном переходе трёхвалентного железа в двухвалентное состояние. Экспериментально установлено, что восстановительная способность различных углей коррелирует с их зольностью и содержанием серы.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментального изучения процессов жидкофазного восстановления железа коксовыми остатками углей. Показано, что существенное значение для процесса Ромелт имеет валентное состояние железа в исходном сырье. Для переработки высокоокисленного железорудного сырья предложен комплекс из двух печей «дуплекс процесс Ромелт»

В результате проведённых исследований автором диссертационной работы Макеевым С.А. получены и сформулированы следующим образом **новые научные результаты**:

1. Теоретически (термодинамически) 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.

2. Проведено термодинамическое моделирование (ТДМ) жидкофазного восстановления оксидов железа и формирования чугуна в шлаковом расплаве с учетом удаления из реакционной зоны газообразных продуктов.

3. Методами ТДМ показано, что жидкофазное восстановление до металлического железа возможно только после практически полного перехода



( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в ( $\text{FeO}$ ). Экспериментально установлено, что восстановление железа до металла из шлака с доминированием  $\text{Fe}^{3+}$  идет медленнее; при этом на начальных стадиях процесса происходит резкое снижение доли  $\text{Fe}^{3+}$  в шлаке, связанное с восстановлением до  $\text{Fe}^{2+}$ .

4. По совокупности исследований дано объяснение зависимости производительности печи Ромелт от соотношения оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ) в перерабатываемом сырье.

Достоверность полученных результатов обеспечена сочетанием теоретических (термодинамических) расчетов с использованием самосогласованной базы термодинамических данных ТСИВ ИВТАНТЕРМО и экспериментального изучения рассмотренных процессов с применением современных аттестованных методов исследования.

#### **Практическая значимость** диссертационной работы:

1. Установлено, что при растворении гематита в шлаке неизбежно будет присутствовать оксид трехвалентного железа. Для температур и концентраций железа в шлаке, типичных для печи Ромелт, доля двухвалентного железа при диссоциации гематита не превышает 10-15 %.

2. Показано, что при переработке в печи Ромелт железорудных материалов на основе трехвалентного железа происходит снижение производительности и увеличение концентрации железа в шлаковом расплаве.

3. Для улучшения управления процессом Ромелт наряду с мониторингом содержания общего железа в шлаковой ванне необходимо дополнительно контролировать соотношение ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )/( $\text{FeO}$ ).

4. В промышленных агрегатах жидкофазного восстановления следует ограничить применение углей, содержащих сульфиды железа.

5. Предложены новые решения по совершенствованию технологии Ромелт позволяющие добиться улучшения технологических показателей при переработке сырья, в составе которого доминирует трехвалентное железо: вдувание мелких фракций угля в шлаковую ванну печи Ромелт и разделение процессов растворения/предвосстановления до  $\text{Fe}^{2+}$  исходного сырья и окончательного восстановления/формирования чугуна (дуплекс-процесс Ромелт).

По диссертационной работе работы имеются следующие **замечания**:

1) В главе 2 при проведении термодинамического моделирования дискуссионным является выбор в качестве нейтрального компонента жидкого шлака  $\text{SiO}_2$ , так как по двойной диаграмме  $\text{FeO-SiO}_2$  при температурах ниже 1500 °С жидкая оксидная фаза присутствует только при содержании  $\text{SiO}_2$  менее 45% (массовая доля), а оксиды железа в твердом  $\text{SiO}_2$  практически не растворяются. При этом в тексте диссертации указано, что для моделирования

равновесия для компонента  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  была выполнена экстраполяция термодинамических данных базы ИВТАНТЕРМО для жидкого гематита, однако, для  $\text{SiO}_2$  аналогичное пояснение отсутствует.

2) При проведении термодинамических расчётов в главах 2 и 3 дискуссионным является допущение, что состав типичного шлака процесса Ромелт ( $40\text{--}45 \text{ SiO}_2$ ,  $35\text{--}40 \text{ CaO}$ ,  $10\text{--}15 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $5\text{--}10 \text{ MgO}$ ) является идеальным раствором по отношению к оксидам железа и коэффициенты активности равны 1. В тоже время, расчёт по модели совершенного ионного раствора В.А. Кожеурова показывает, что коэффициента активности  $\text{FeO}$  находится в пределах  $3\text{--}4$  для типичного состав шлака процесса Ромелт.

3) В диссертационной работе получены экспериментальные данные по изменению доли трёхвалентного железа и скорости восстановления оксидов железа из шлака. Однако, отсутствует обработка этих данных методами формальной кинетики с определением константы скорости и порядка суммарной реакции процесса восстановления, что помогло бы описать полученные S-образные зависимости и наличие нескольких стадий (инкубационный, главный и конечный периоды).

4) Неудачно сформулирован второй пункт научной новизны, который отражает содержание проведенной работы, а не новые результаты, полученные диссертантом.

5) Следовало бы сравнить размер частиц пыле-угольного топлива, предлагаемого диссертантом для вдувания в зону на уровне фурм нижнего яруса (частицы размером менее 5 мм, стр. 86 текста диссертации), с оптимальными значениями, полученными в известных работах.

6) Идея двухзонной печи Ромелт впервые была высказана в НИТУ МИСиС в конце 1980-х годов. В работах Роменца В.А., Валавина В.В., Похвиснева Ю.В. и др. теоретическими расчётами показано, что, например, при переработке конвертерных шламов, двухзонный вариант проигрывает одностадийному по ряду технологических и экономических показателей. Поэтому необходимо привести аналогичное сравнение предлагаемого диссертантом «дуплекс-процесса» с одностадийным вариантом при переработке сырья с высоким содержанием трёхвалентного железа.

Диссертация написана технически грамотным языком, оформлена в соответствии с действующими нормативами. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных работ, и достаточно полно отражают основное содержание диссертации.



### Заключение

Несмотря на имеющиеся замечания, представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и обладающей внутренним единством, и соответствует специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Диссертационная работа Макеева Сергея Александровича отвечает требованиям ВАК РФ в части п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), в которой содержится решение задач, имеющих большое значение для металлургической отрасли народного хозяйства. В частности, для организаций, обеспечивающих комплексное исполнение проектов в металлургии – ООО «МетПромПроект», ОАО «Ленгипромез», АО «ВО «Тяжпромэкспорт» и ряда других. Разработанная при непосредственном участии Макеева С.А. концепция дуплекс-процесса Ромелт используется при подготовке предложений по коммерческой реализации проектов для металлургических предприятий РФ и зарубежных стран.

Автор диссертационной работы «Физико-химические особенности жидкофазного восстановления оксидов железа углеродсодержащими материалами» **Макеев Сергей Александрович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Доклад по диссертационной работе заслушан и обсуждён на расширенном коллоквиуме лаборатории физикохимии металлических расплавов им. академика А.М. Самарина и лаборатории диагностики материалов. За предложенное заключение проголосовали единогласно. Протокол №2 от 25 апреля 2018 года.

Председатель коллоквиума  
заведующий лабораторией  
физикохимии металлических расплавов  
им. академика А.М. Самарина  
института металлургии и  
материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
доктор техн. наук.



Дашевский В.Я.

Учёный секретарь коллоквиума  
старший научный сотрудник  
лаборатории диагностики материалов  
кандидат техн. наук



Алпатов А.В.

