

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 <http://www.imet.ac.ru>



«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ИМЕТ РАН

Чл.-корр.

А.Г. Колмаков

«30» ноября 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Зубарева Кирилла Александровича «Исследование процессов рафинирования сплавов на основе железа и никеля в вакууме с целью совершенствования технологии плавки в вакуумной индукционной печи», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

При выплавке металла в вакуумных дуговых печах происходит рафинирование расплава от легколетучих и газообразующих примесей, при этом испаряются ценные легирующие компоненты. Существующие подходы для описания испарения компонентов из легированных расплавов на основе железа и никеля не позволяют прогнозировать этот процесс с достаточной точностью. При расчёте количества раскислителей обычно не учитывают взаимодействие с материалом футеровки, которая в условиях вакуумной плавки может определять содержание кислорода и примесей в расплаве. В настоящее время данные о раскислительной способности некоторых элементов, обладающих высоким сродством к кислороду, например, кальций, противоречивы. Решению всех вышеописанных проблем посвящена данная диссертационная работа.

В связи с этим **актуальность темы диссертации** Зубарева Кирилла Александровича не вызывает сомнений, так как она посвящена решению важных для практики теоретических проблем, а именно – разработке адекватного количественного описания процессов испарения примесей, легирующих компонентов, основы расплава и раскислению жидкого металла в вакууме.

Содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность исследуемых проблем, описаны цели работы, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по тематике исследования. Показано, что процессы рафинирования и раскисления являются основными операциями, влияющими на металлургическое качество получаемого металла при выплавке сплавов на основе железа и никеля в вакуумной индукционной печи. Глава заканчивается формулировкой целей диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание базы данных для термодинамического моделирования. Рассмотрены существующие подходы для количественного описания процесса испарения многокомпонентных расплавов (уравнение Лангмюра, уравнение типа Олетте и т.д.) и проанализированы их недостатки и преимущества. Представлено подробное описание разработанной методики расчета испарения элементов многокомпонентного расплава в вакуумной индукционной печи. Приведено сравнение результатов расчёта по разработанной модели с экспериментальными литературными данными по испарению хрома, меди и олова из стали X18H10, никеля и марганца из сплава системы Ni-Mn, свинца и меди из сложнолегированного никелевого сплава. Также во второй главе представлены результаты собственных экспериментальных исследований диссертанта по испарению меди из никелевого сплава на основе системы Ni-Mn. Следует отметить, что результаты расчёта по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Третья глава посвящена моделированию процессов взаимодействия сложнолегированных сплавов на основе железа и никеля с футеровкой при помощи программы Gibbs 3.2. Показана принципиальная разница в зависимости равновесной концентрации кислорода от давления при использовании футеровки из магнезита и из корунда. Приведено сравнение расчётных значений растворённого кислорода с экспериментальными данными.

На основе выполненного моделирования определены оптимальные, с точки зрения минимальной равновесной концентрации кислорода, интервалы остаточного давления в камере вакуумной печи при использовании магнезитовой и корундовой футеровок.

В четвертой главе приведён анализ процессов удаления кислорода из сплавов на основе железа и никеля, при этом основное внимание уделено

кальцию – как наиболее сильному и часто применяемому раскислителю и модификатору. Термодинамические данные по раскислительной способности кальция, имеющиеся в литературе, весьма противоречивы, поэтому в диссертационной работе предложен оригинальный подход к анализу экспериментальных данных для жидкого железа.

Проведено сравнение расчётной кривой раскисления железа кальцием, полученной с использованием предложенного подхода по учёту неметаллических включений СаО, искажающих реально наблюдаемые значения равновесного содержания кислорода, с литературными данными.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию выплавки никель-медных сплавов в вакуумной печи сопротивления. Рассчитанные по предложенной во второй главе методике значения потерь меди подтверждены экспериментально. Показано положительное влияние присадки алюминия на стойкость огнеупорной корундовой футеровки.

Исследование микроструктуры никель-медных сплавов показало, что наибольшая загрязнённость металла неметаллическими включениями наблюдалась на плавках, где происходило интенсивное взаимодействие с футеровкой тигля.

На основе проведённых исследований для каждого отдельного сплава возможен обоснованный выбор условий выплавки (материал тигля, время плавки, давление, температура и т.д.), обеспечивающий минимальной взаимодействие с огнеупорной футеровкой, низкие концентрации кислорода и минимальное загрязнение сплава неметаллическими включениями.

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

- 1) Разработана новая модель и алгоритм расчета испарения компонентов сложнолегированных расплавов на основе железа и никеля в глубоком вакууме, основанные на использовании уравнений Лангмюра и баланса масс компонентов. В отличие от методики расчета Олетте, описывающей относительные потери элементов при их испарении из двухкомпонентного раствора, разработанная методика позволяет рассчитывать одновременно испарение всех элементов многокомпонентного сплава;
- 2) Определены благоприятные интервалы остаточного давления в камере вакуумной печи при использовании магнезитовой и корундовой футеровки. При

повышенных давлениях (от 10 до 101 кПа для чистого железа и от 0,01 до 101 кПа для никеля) магнезитовая футеровка дает минимальный прирост кислорода в расплаве. При пониженных давлениях (от 0,1 до 10000 Па для железа и от 0,1 до 10 Па для никеля) минимальный прирост концентрации кислорода дает корундовая футеровка;

3) Показано, что введение алюминия в расплав обеспечивает снижение взаимодействия металла с корундовой футеровкой и понижает количество кислорода, поступающего из тигля в расплав за счет смещения равновесия реакции взаимодействия металла с футеровкой в сторону образования оксида алюминия;

4) Предложена новая методика описания экспериментально наблюдаемых данных по раскислению железа кальцием, которая отличается тем, что константа равновесия реакции раскисления железа кальцием получена методом комбинирования, а содержания кислорода и кальция складываются из концентраций растворенных компонентов и связанных в неметаллические включения.

Обоснованность научных результатов не вызывает сомнений, так как они получены с учётом современных теоретических представлений о процессах испарения и рафинирования жидких металлов в вакууме, и основаны на анализе и использовании большого массива термодинамических данных и экспериментальных исследований, в том числе выполненных автором диссертационной работы самостоятельно.

Практическая значимость диссертационной работы:

1) Разработаны компьютерные программы для расчёта испарения элементов при вакуумно-индукционной плавке сплавов на основе железа и никеля. Программы для ЭВМ зарегистрированы в федеральной службе по интеллектуальной собственности и активно используются в учебном процессе, а также при выполнении прикладных научных исследований.

2) Расширена термодинамическая база данных для сплавов на основе железа и никеля с целью использования их в компьютерных программах термодинамического моделирования систем «металл - шлак - газовая фаза» (Gibbs 3.2).

3) Предложенная схема расчёта испарения элементов при выплавке сплавов на основе никеля использована при выполнении проектных работ в организациях АО «НПО ЦНИИТМАШ» и ЗАО «ИОМЗ».

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

- 1) Использование разработанной методики расчёта, а именно учёт баланса масс, должен приводить к уменьшению скорости испарения компонентов с течением времени, однако, для некоторых элементов и систем (например, для хрома в стали X18H10) экспериментально наблюдалась линейная зависимость концентрации от времени, которая может быть получена по обычному уравнению Лангмюра.
- 2) При расчёте кривой раскисления жидкого железа кальцием диссертант отказался от массовых параметров взаимодействия, однако, как следует из приведённых в диссертации расчётов, вводится новый параметр – количество взвешенных включений СаО, который в разных экспериментах изменяется на порядок (от 0,4 ppm до 52 ppm). Складывается впечатление, что удовлетворительное согласие расчётных и экспериментальных данных на рисунке 9 автореферата достигнуто подбором оптимального значения количества взвешенных включений оксида кальция.
- 3) Необходимо более чётко раскрыть причины низкой стойкости периклазовой футеровки тигля в глубоком вакууме.

Диссертация написана технически грамотным языком, оформлена в соответствии с действующими нормативами. Автореферат диссертации соответствует её содержанию. Диссертация состоит из пяти глав, заключения, библиографического списка из 56 источников. Диссертация изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 26 таблиц, 67 рисунков и 8 приложений.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 печатных работах в рецензируемых научных журналах, 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 Зубарева Кирилла 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 предприятий производственного сектора экономики страны, применяющих вакуумно-индукционные переплав металлов, а также занимающихся проектированием вакуумных установок – АО «НПО «ЦНИИТМАШ», ЗАО «Ижевский опытно-механический завод». Результаты диссертации, в частности компьютерные программы для расчёта испарения элементов при вакуумно-индукционной плавке сплавов на основе железа и никеля, использованы в учебном процессе и при выполнении прикладных научно-исследовательских работ.

Автор диссертационной работы «Исследование процессов рафинирования сплавов на основе железа и никеля в вакууме с целью совершенствования технологии плавки в вакуумной индукционной печи» **Зубарев Кирилл 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 № 3 от 30 ноября 2016 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.

Сведения о ведущей организации

по диссертации Зубарева Кирилла Александровича

«Исследование процессов рафинирования сплавов на основе железа и никеля в вакууме с целью совершенствования технологии плавки в вакуумной печи» по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов» на соискание ученой степени кандидата технических наук

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ИМЕТ РАН
Место нахождения	г. Москва
Почтовый индекс, адрес организации	119334, г. Москва, Ленинский пр., 49
Телефон	+7 (499) 135-20-60, 135-86-11; факс: 135-86-80
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	http://www.imet.ac.ru
E-mail	imet@imet.ac.ru
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях	
1.	Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe-Co, содержащих кремний // Металлы, 2013, № 6, с. 21-25
2.	Ригин В.Е., Сидоров В.В., Бурцев В.Т. Исследование активности кислорода в расплавах никеля, содержащих рений, при вакуумной индукционной плавке // Электрометаллургия, 2012, №11, с.21-26
3.	Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в жидком никеле, содержащем цирконий // Доклады Академии наук, 2016, т. 468, №3, с. 293
4.	Ригин В.Е., Сидоров В.В., Бурцев В.Т. Удаление азота из сложнолегированных расплаво на основе никеля в процессе их обезуглероживания // Труды ВИАМ, 2016, №1(37), с. 10-
5.	Шильников Е.В., Алпатов А.В., Падерин С.Н. Термодинамический анализ окислительного периода плавки жаропрочного многокомпонентного сплава на основе никеля // Металлы, 2013, №6, с. 3-11
6.	Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в жидком никеле, содержащих алюминий и титан // Известия вузов. Черная металлургия, 2016, т. 59, № 7, с. 485-490
7.	Линчевский Б.В., Дашевский В.Я., Александров А.А. Исследование процессов раскисления // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Металлургия, 2015, №3, с. 24-32
8.	Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегированных ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований, 2015, №1(85), с. 32-37
9.	Шильников Е.В., Алпатов А.В., Падерин С.Н. Термодинамический анализ поведения кислорода при внепечной обработке высоколегированной стали 08X18H10T // Известия вузов. Черная металлургия, 2013, № 11, с. 19-24
10.	Бурцев В.Т. Сульфидная ёмкость шлаков традиционного и нетрадиционного составов // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения 2011, №4, с. 5-11

Председатель коллоквиума

заведующий лабораторией

физикохимии металлических расплавов

им. академика А.М. Самарина

ИМЕТ РАН, доктор техн. наук.

Дашевский В.Я.

Зубарев В.Я. Дашевский В.Я.
Наз. с.р. *Коробкина Г.А.*