

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертационную работу Корзуна Евгения Леонидовича на тему:  
«Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода», представленную на соискание  
ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.16.02 Metallургия черных, цветных и редких металлов  
(технические науки)

#### **Актуальность темы исследования**

Одной из наиболее сложных задач в рафинировании сталей и, особенно, никелевых сплавов является деазотация. Наблюдается нестабильное достижение желаемой степени деазотации, часто азот практически не удаляется из стали. Отчасти это связано с отсутствием обобщенного термодинамического описания управления поведением содержания азота в расплавах металлов. Кроме того, причиной отсутствия гарантированного результата в рафинировании по-прежнему является человеческий фактор.

Актуальной проблемой настоящего времени является и организация производства коррозионностойких сплавов на никелевой основе для тепловой и атомной энергетики, предусматривающего получение помимо низких содержаний азота и неметаллических включений в готовом металле и низкой концентраций углерода.

Таким образом, проблема получения сталей и сплавов на никелевой основе с низкими содержаниями азота и углерода, а также легированных сталей с гарантированно высокими показателями качества, в том числе и сталей, легированных азотом, весьма актуальна. Она может быть разрешена путём создания устойчивых комплексных технологий, систем управления сталеплавильными агрегатами и агрегатами внепечной обработки на базе новых подходов к описанию металлургических процессов и установленных соответствующих зависимостей.

#### **Структура и анализ работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 516 наименований, и 5 приложений. Материалы диссертации изложены на 435 страницах машинописного текста, содержат 116 рисунков и 77 таблиц.

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, перечислены полученные автором результаты.

В первой главе представлено современное состояние металлургических технологий, обеспечивающих заданное содержание азота и углерода в сплавах на железной и никелевой основах, и перспективы их развития путем совершенствования термодинамического описания систем «газ-шлак-металл». Здесь следует отметить сделанный обширный обзор (516 источников), в котором достойное отражение получили результаты исследований научной школы

А.Г.Пономаренко.

Во второй главе описаны методики проведения исследований, включающих описание методики проведения по влиянию технологических факторов на содержание азота при выплавке стали в ДСП и внепечной обработке на установке ковш-печь; методику проведения экспериментов по выплавке специальных сталей и сплавов на никелевой основе; методика термодинамического моделирования и методика статистического анализа полученных данных.

В третьей главе представлено совершенствование термодинамического описания равновесия в системе «газ-шлак-металл».

В четвертой главе представлено развитие металлургических технологий получения регламентированного содержания азота в сталях и сплавах, включающих в себя разработку технологий, обеспечивающих удаление и стабилизацию содержания азота в ванне дуговой сталеплавильной печи и сталеразливочном ковше, и разработку промышленных технологий производства слитков сталей, легированных азотом.

В пятой главе описана разработка технологических приёмов повышения качества сплавов на никелевой основе за счёт управляемого снижения содержания азота, углерода и карбонитридных включений.

### **Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

*Достоверность и обоснованность* результатов работы обеспечивается их получением на основе экспериментов, проведенных с использованием современного научного оборудования и апробированных аналитических методов. Достоверность полученных результатов обеспечена применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных и аналитических методик и подтверждена их воспроизводимостью. Следует отметить, что в основу теоретических исследований положены фундаментальные физико-химические законы, что обеспечивает универсальность применения полученных результатов.

*Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:*

- впервые установлено влияние парциальных давлений моноатомных углерода  $P_C$  и кислорода  $P_O$  над расплавом железа на растворимость углерода в нем и количественно определена взаимосвязь указанных характеристик системы "расплав железа – газовая фаза";

- получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раствора кислорода в жидком железе: получены уточненные уравнения изменения энергии Гиббса в реакции растворения кислорода в жидком железе и зависимости активности кислорода в нём;

- получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раствора углерода в жидком железе за счёт уточнения уравнения изменения энергии Гиббса в реакции растворения конденсированного углерода в жидком железе;

- получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раскислительной способности углерода в тройной системе Fe-C-O. Установлено, что для обеспечения непрерывности снижения активности кислорода, растворённого в железе, при снижении общего давления в системе необходимо

поддерживать восстановительный характер газовой фазы, а для соответствующего снижения активности углерода – окислительный характер газовой фазы;

- получило дальнейшее развитие термодинамическое описание металлургических газовых фаз, содержащих азот: установлено, что наименьшей активностью азот обладает в газовой смеси с инертными газами, а примеси восстановительных (водород, оксид углерода (II)) и окислительного (кислород) компонентов в газовой смеси приводят к росту активности азота;

- впервые установлены зависимости коэффициента межфазного распределения азота в системе «железо – азотсодержащая газовая фаза» от концентрации и активности азота в газе и температуры;

- впервые установлена эмпирическая зависимость содержания азота в сплаве на никелевой основе ВЖ 159 после вакуумного дугового переплава от концентраций ниобия, бора и азота в металле расходуемого электрода.

### **Практическая и теоретическая значимость**

*Теоретическая значимость* работы заключается в следующих положениях:

- установлено влияние окисленности системы «металл-газ», определенной через парциальное давление атомарного кислорода, на равновесную концентрацию углерода в расплаве железа;

- получил дальнейшее развитие метод описания термодинамического равновесия металлургической системы «металл-шлак-газ», основанный на принципе равенства активностей компонентов в фазах системы, при этом компонентами всех фаз считаются химические элементы;

- получило дальнейшее развитие термодинамическое описание металлической фазы с использованием модели металлических растворов, учитывающей валентные электроны компонентов как отдельный компонент фазы; модель опробована при описании систем Fe-O, Fe-N, Fe-Cr-N;

- установлена определяющая роль градиента окисленности шлака в системе «металл-шлак-газ» на поведение азота в процессах деазотации стали при выплавке и внепечной обработки вне зависимости от основного компонента шлака, имеющего отрицательную степень окисления, кислорода или фтора;

- получило дальнейшее развитие представление о взаимосвязи температур ликвидуса и солидуса с учётом неравновесного процесса затвердевания, растворимости азота на примере легированных азотом сталей 08X18H5Г12АБ, 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ. Получены соответствующие эмпирические зависимости, пригодные для любого химического состава этих сталей в рамках нормативных требований к ним.

*Практическая значимость* работы заключается в следующих положениях:

- усовершенствована технология электрометаллургического производства высокоуглеродистой стали для изготовления катанки с дальнейшей переработкой в корд, позволяющая получить содержание азота в заготовке не более 80 ppm без применения вакуумирования;

- разработаны и опробованы технологические приёмы, позволяющие устранить повышение концентрации азота на заключительном этапе

окислительного периода выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи;

- уточнённые в работе термодинамические зависимости поведения кислорода и углерода в расплавах на основе железа использованы в разработке современных систем автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами выплавки и внепечной обработки стали;

- усовершенствована технология производства азотсодержащих коррозионностойких немагнитных сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ с содержанием азота, близкому к пределу его растворимости при атмосферном давлении;

- усовершенствована технология триплекс-процесса производства жаропрочного сплава на никелевой основе Inconel 718 с гарантированно низким содержанием азота (не выше 65 ppm);

- разработана и реализована на практике технология двухстадийного вакуумного индукционного процесса производства коррозионностойкого сплава на никелевой основе ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) с гарантированно низким содержанием углерода (не выше 50 ppm) и азота (не выше 50 ppm).

Следует отметить большой объем промышленных экспериментов (с дальнейшим внедрением результатов), проведенных на ряде ведущих металлургических предприятий. Так, технология выплавки углеродистой стали 70 с содержанием азота не выше 0,008 % масс. внедрена в ЭСПЦ Молдавского металлургического завода, регулирование интенсивности вдувания углеродного порошка внедрена в ЭСПЦ Донецкого металлургического завода, системы мониторинга, автоматизированного проектирования и управления сталеплавильными процессами внедрены в ЭСПЦ Молдавского металлургического завода, ЭСПЦ Белорусского металлургического завода, суммарный экономический эффект составил 186,246 млн. руб.

### **Апробация результатов работы**

Результаты работы доложены и обсуждены на пятнадцати научно-практических конференциях в период 2001-2019 гг.

**Публикации.** Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 16 научных работах, 9 из которых представлены в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 2 – в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, а также получено 4 патента РФ на изобретение (информация взята из научной электронной библиотеки «e-library»).

### **Замечания и вопросы по диссертационной работе Корзуна Е.Л.**

1. В выводах п.п. 4.2 указано, что большая часть зависимостей из расчета растворимости азота дают завышенные значения в стали 12X18АГ18 и на данном этапе развития обуславливает поиск и применение на практике не универсальных уравнений, а частных зависимостей для конкретных марок сталей и сплавов. Однако если обращаться к данным в табл. 4.13, уравнение (1.40) позволяет



установить показатель растворимости азота в исследуемой марке стали ниже содержания, получаемого регрессионной зависимостью (4.13) на 0,0436 масс. %. Имеется ли возможность использования данного выражения в условиях промышленного производства для выплавки сталей, легированных азотом, либо каждая марка стали требует отдельной расчетной зависимости и этот вопрос требует дальнейшей разработки?

2. В п.п. 4.2 приведены 3 регрессионные зависимости растворимости азота в жидких сталях марок 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18 и 04X20Н6Г11М2АФБ, однако проведено сравнение получаемых значений со значениями расчетными формулами (1.30) ÷ (1.59) только для одной марки стали. В тексте не отражено, но имеются ли данные о применимости теоретических формул для сталей марок 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и 04X20Н6Г11М2АФБ и какое расхождение они имеют с разработанными зависимостями в ходе статистической обработки результатов термодинамического моделирования?

3. Недостаточно подробно изложены технологии производства высокоазотистых сталей марок сталей 08X18H5Г12АБ, 12X18АГ18 и 04X20Н6Г11М2АФБ. В частности неясно, какие лигатуры использовались для получения содержаний азота в сталях более 0,5%?

4. В рукописи указано, что для проведения электрошлакового переплава сплава Inconel 718 использовали промышленный флюс АКФ225ТМ, однако для экспериментальных переплавов сталей марок 04X20Н6Г11М2АФБ и 12X18АГ18 указано «флюс с температурой плавления 1100 °С». Для данных работ использовался флюс той же марки и состава или же отличался? Если отличался, то какой состав имел данный флюс и чем обоснован его выбор?

5. В дополнение к предыдущему вопросу. Возможна ли замена флюса АКФ225ТМ и флюсов, использующихся для других переплавов на флюс марки АНФ-6, имеющего в составе:  $Al_2O_3=25-31\%$ ,  $CaF_2=60-72\%$ ,  $CaO=5-8\%$ , н.б. 0,1% С, н.б. 0,5%  $Fe_2O_3$ , н.б. 0,05% S, н.б. 0,02% P, н.б. 0,05%  $TiO_2$ ? Если замена невозможна, то по каким причинам?

6. На мой взгляд объем диссертации в 435 страниц избыточно велик. При этом основное содержание работы изложено на 298 страницах (при рекомендации – не более 250 страниц). Бросаются в глаза большие по объему приложения А, Б и В (они изложены на 71 страницах), где приведен статистический анализ результатов моделирования фазового равновесия сталей 08X18H5Г12АБ, 12X18АГ18 и 04X20Н6Г11М2АФБ. Достоверность этих результатов не вызывает сомнения, поэтому они могли бы приведены в сжатом виде.

### **Заключение**

Несмотря на приведенные в отзыве замечания, имеющих непринципиальный, зачастую дискуссионный характер, диссертация Корзуна Евгения Леонидовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований, решена важная научно-техническая проблема.

Автореферат диссертации отражает ее содержание.

Основные положения, выносимые на защиту, обсуждены на многочисленных конференциях, и опубликованы в реферируемых журналах.

Работа отвечает требованиям к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, определенным п. 2 Положения о присуждении ученых степеней, и может быть представлена к защите в ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», а её автор, Корзун Евгений Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 Metallurgy черных, цветных и редких металлов (технические науки).

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
металлургии и химических технологий

Бигеев Вахит Абдрашитович

«28» марта 2022 года

455000, Россия, г. Магнитогорск, проспект Ленина, д. 38. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), тел., +7(3519)29-85-59, [v.bigeev11@yandex.ru](mailto:v.bigeev11@yandex.ru)

Подпись Бигеева В.А. заверяю:

