



**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский  
национальный исследовательский  
технический университет»

М.В. Корняков

« 1 » 10 2024 г.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Диссертация Ильина А.А. «Повышение эффективности получения металлургического кремния при использовании борсодержащих флюсов» выполнена на кафедре металлургии цветных металлов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНТУ»).

В 2011 г. Ильин А.А., гражданин Казахстана, окончил обучение в Некоммерческом акционерном обществе «Карагандинский государственный индустриальный университет» (НАО «КарИУ»), г. Темиртау, по специальности 050709 «Металлургия» с присвоением академической степени «Бакалавр». В 2011 г. поступил на обучение в магистратуру НАО «КарИУ» на специальность 6M071200 «Машиностроение», в 2013 г. успешно ее окончил с присвоением академической степени «Магистр техники и технологии».

С 2019 по 2022 гг. прошел курс обучения и выполнил все виды учебной деятельности докторантуры PhD в НАО «КарИУ» по специальности 6D07202 «Металлургия черных и цветных металлов». Научными консультантами являлись: кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлургия и материаловедение» НАО «КарИУ» Зобнин Николай Николаевич и доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «ИРНТУ» Немчинова Нина Владимировна.

В настоящее время Ильин А.А. является научным сотрудником НАО «КарИУ», с 2024 г. прикреплен соискателем по кафедре металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» для сдачи кандидатских экзаменов и подготовки диссертации.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по иностранному языку, истории и философии науки и по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов году выдана ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» в 2024 г.

Научный руководитель – Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образо-



вательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», заведующая кафедрой металлургии цветных металлов.

На заседании присутствовали:

Кафедра металлургии цветных металлов:

1. Баранов Анатолий Никитич – профессор каф., д.т.н., профессор;
2. Бельский Сергей Сергеевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
3. Васильев Андрей Анатольевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
4. Кузьмина Марина Юрьевна – доцент каф., к.х.н., доцент;
5. Минеева Татьяна Султановна – доцент каф., к.т.н., доцент;
6. Немчинова Нина Владимировна – заведующая кафедрой, д.т.н., профессор;
7. Петровский Алексей Анатольевич – доцент каф., к.т.н.;
8. Тютрин Андрей Александрович – доцент каф., к.т.н., доцент.
9. Сысоев Иван Алексеевич – доцент каф., к.т.н., доцент.
10. Другов Игорь Александрович – аспирант каф.

Институт заочно-вечернего обучения:

11. Белоусова Ольга Викторовна – директор, к.т.н., доцент.

Кафедра Х и БТ им. профессора В.В. Тутуриной:

12. Яковлева Ариадна Алексеевна – профессор каф., д.т.н., профессор.

### **По итогам обсуждения принято следующее заключение**

Представленная Ильиным Александром Александровичем диссертация обобщает самостоятельные исследования автора и является завершенным научным трудом, выполненным по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.

#### ***Актуальность темы диссертации***

В процессе производства MG-Si в РТП возникают проблемы, связанные с образованием тугоплавких шлаков, которые скапливаются на подине печи и перегораживают леточное отверстие, не давая возможности произвести выпуск кремния. Восстановление нормального хода плавильной печи – достаточно сложный процесс, сопровождаемый значительными экономическими потерями (повышенными расходами электроэнергии и сырьевых материалов, дополнительными затратами на дополнительные флюсы и др.). Для быстрого решения проблемы ошлакования леточного отверстия в практике металлургического производства применяют флюсы (например, оксиды кальция, магния, бора), способствующие понижению вязкости тугоплавких шлаков и выведению их из печи. Однако в металлургии кремния при введении дополнительных компонентов в шихту плавки возникает проблема: загрязнение расплава MG-Si вводимыми элементами. Особенно снижает качество целевого продукта примесь бора, ухудшающая свойства кремния, применяемого в качестве исходного материала для изготовления солнечных модулей и батарей. В связи с этим исследования по изучению физико-химических свойств шлаков, характерных для периодов ошлакования леточного отверстия РТП при выплавке MG-Si, разработка мероприятий, направ-



ленных на стабилизацию работы РТП (при введении борсодержащих флюсовых добавок) и последующего рафинирования кремниевого расплава от бора, являются перспективными и актуальными.

Работа выполнена в направлении утвержденной Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020–2025 годы, основной целью которой является конкурентоспособная обрабатывающая промышленность Республики Казахстан на внутреннем и внешних рынках.

*Целью работы соискателя явилась* разработка технологических решений, направленных на стабилизацию работы электродуговой печи при выпуске MG-Si за счет применения борсодержащих флюсов с последующей очисткой от бора кремниевого расплава.

#### ***Основные научные результаты и их новизна***

На основе изучения корреляционных зависимостей между динамической вязкостью шлаков и параметрами их структуры определена оптимальная основность шлака кремниевой плавки ( $\text{CaO/SiO}_2 = 0,61-0,63$ ) при содержании оксида бора в нем  $\approx 1\%$  для устранения ошлакования подины рудотермической печи.

Установлено, что процесс восстановления кремния из кремнезема шлаковых систем в слабовосстановительных условиях не оказывает влияния на переход бора из кремниевого расплава в шлак.

Установлено влияние параметров комбинированного рафинирования кремниевого расплава (скорости воздуха в сопловом сечении продувочной фурмы и содержания оксида или фторида лития 3–5 % в рафинирующем шлаке состава CaO-SiO<sub>2</sub>) на скорость удаления бора и его остаточное содержание в металлургическом кремнии.

*Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации, заключается* в формулировке задач диссертационного исследования; в подготовке образцов модельных шлаков, MG-Si и печных шлаков к исследованиям; проведении анализов; разработке компьютерной программы для ЭВМ; выполнении необходимых расчетов; проведении лабораторных испытаний, математической обработке и обобщении полученных результатов экспериментальных исследований; проведении укрупненно-промышленных испытаний; анализе и сопоставлении экспериментальных и теоретических данных; подготовке научных публикаций и материалов для участия в конференциях; формулировке выводов, рекомендаций и заключения по работе.

*Достоверность и обоснованность полученных результатов* полученных результатов обеспечивается необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований. Степень достоверности результатов исследований обусловлена их соответствием известным тенденциям развития кремниевой отрасли, ранее полученным результатам и разработкам, а также доказываемая с позиции теории пиromеталлургических процессов и практики аналогичных процессов; применением современных аналитических методов исследований и сертифицированного оборудования лабораторий ИРНТУ и КарИУ.

#### ***Практическая значимость***



Проведенные укрупненно-лабораторные испытания по выплавке MG-Si в одноэлектродной электродуговой печи мощностью 250 кВ·А с добавкой в плавку флюсов – колеманита и извести – показали стабильную работу печи без трудностей при выпуске кремниевого расплава (имеется акт испытаний). Основность шлака составила 0,63 при содержании оксида бора 1,07 %.

Показано, что при использовании колеманита в процессе плавки поступление бора в MG-Si снизилось на 17,94 %, что связано, по нашему мнению, со снижением времени контакта накапливающегося на подине расплава шлака с жидким кремнием. Добавка борсодержащего флюса также обеспечило снижение расхода шихтовых материалов на 7,17 % за счет сокращения продолжительности периодов очистки плавильной ванны от накопленного на подине вязкого шлака.

Для более глубокой очистки кремниевого расплава от бора рекомендован комбинированный способ: окислительная продувка (со скоростью воздуха в сопловом сечении продувочной фурмы до 250–290 м/с) с одновременной обработкой рафинирующим шлаком следующего состава: CaO и SiO<sub>2</sub> в соотношении 1:1 с добавкой 3–5 % оксида или фторида лития. По результатам лабораторных испытаний продолжительность рафинирования составила 8–10 мин за счет меньшей кратности шлака (40–50 %) по окончании продувки.

Согласно предварительной оценке экономического эффекта от использования борсодержащих флюсов при выплавке MG-Si, снижение себестоимости продукции составляет 41259,5 тенге/т или, с учетом курса 5 тенге за 1 российский руб., 8251,9 руб./т MG-Si. Ожидаемый годовой экономический эффект для проектируемого кремниевого завода ТОО «ANSA Silicon» (г. Экибастуз, Республика Казахстан) составляет 1 444,08 млн тенге (288,82 млн руб.) при плановой производительности 35 тыс. т MG-Si в год.

Проведенная экологическая оценка введения при выплавке MG-Si борсодержащего флюса в сочетании с известью показала, что концентрация загрязняющего вещества (ортобората кальция) составляет у источника выброса не более 0,6 от среднесуточного ПДК, а на границе санитарно-защитной зоны – от 0,05 до 0,15 ПДК (для условий проектируемого предприятия ТОО «ANSA Silicon»).

Рекомендована технологическая схема получения MG-Si с применением борсодержащих флюсов для стабилизации работы электродуговой печи при выпуске кремниевого расплава за счет устранения ошлаковывания плавильной ванны.

Полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные результаты, разработанная компьютерная программа для ЭВМ представляют научно-практический интерес для промышленного производства (акт АО «Кремний») и используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» (акты внедрения в ИРНИТУ и КариУ).

**Соответствие диссертации паспорту специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов:** № 2 (Твердое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных и смешанных систем); № 17



(Пирометаллургические процессы и агрегаты); № 20 (Металлургические шлаки и их использование).

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались на LIV Республиканской науч.-практ. конф. «Молодежь, наука и техника: пути совершенствования и интеграции» (г. Темиртау, 8 апреля 2024 г.), XIV Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием «Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств» (г. Иркутск, 24–26 апреля 2024 г.), XII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы – 2024» (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.)

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.** Основные результаты диссертационной работы полностью отражены в следующих научных работах автора.

*Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. Ильин, А.А. Исследование распределения бора между кремнием и шлаками систем  $\text{CaO-SiO}_2$ ,  $\text{MgO-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-MgO-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в восстановительных условиях / А.А. Ильин, И.А. Пикалова, Н.Н. Зобнин // *iPolytech Journal*. – 2024. – Т. 28. – № 2. – С. 371–385.

2. Немчинова, Н.В. Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем  $\text{CaO-SiO}_2$  и  $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  / Н.В. Немчинова, А.А. Ильин, А.А. Тютрин, С.В. Галачиева, А.А. Яковлева // *iPolytech Journal*. – 2024. – Т. 28. – № 3. – С. 562–575.

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus*

3. Ilin, A.A. Distribution of Iron and Boron Between Silicon Metal Smelting Products in Industrial SAF using Borate Fluxes / A.A. Ilin, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova, N.V. Nemchinova // *Silicon*. – 2024. – Vol. 16. – P. 3085–3092.

4. Ilin, A.A. Know-How of the Effective Use of Carbon Electrodes with a through Axial Hole in the Smelting of Silicon Metal / A.A. Ilin, A.S. Yerzhanov, N.N. Zobnin, N.V. Nemchinova, V.I. Romanov // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14(18). – P. 8346.

*Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ*

5. Свидетельство № 2024663922, Российская Федерация, Программа для расчета распределения бора между кремнием и шлаком в восстановительных условиях / А.А. Ильин, Н.В. Немчинова, Н.Н. Зобнин, И.А. Пикалова, А.А. Тютрин, Г.А. Ломтиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИрНИТУ». № заявки 2024662136, заявл. 30.05.2024; опубл. 14.06.2024.

*Другие публикации*

6. Ильин, А.А. Изучение методом рамановской спектроскопии структурных превращений шлаковых систем выплавки кремния металла при их модификации оксидами бора и кальция / А.А. Ильин, И.А. Пикалова, Н.Н. Зобнин, Н.В. Немчинова // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2024 г.). – Иркутск: Изд-во ИрНИТУ, 2024. – С. 54–57.

7. Немчинова, Н.В. Технологический процесс выплавки технического кремния / Н.В. Немчинова, Н.Н. Зобнин, А.А. Тютрин, А.А. Ильин, К.И.

Жидков, Г.А. Ломтиков // Молодежный вестник ИрГТУ, 2024. – Т. 14, № 2. – С. 364–372.

8. Ilin, A.A. Practice of industrial use of coal electrodes with through axial holes in smelting of metallurgical-grade silicon / A.A. Ilin, N.V. Nemchinova, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova, M.E. Guretsky // Цветные металлы и минералы: материалы Международного конгресса и Выставки (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). – Красноярск, 2024. – С. 438–439.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 г., № 842.

Диссертация Ильина Александра Александровича на тему «Повышение эффективности получения металлургического кремния при использовании борсодержащих флюсов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Результаты голосования: «за» – 11 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 2 от 30 сентября 2024 г.

Председатель расширенного заседания  
кафедры металлургии цветных металлов,  
доцент кафедры металлургии цветных  
металлов, к.т.н., доцент

Т.С. Минеева

Секретарь заседания,  
доцент кафедры металлургии цветных  
металлов», к.х.н., доцент

М.Ю. Кузьмина

