

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский
технический университет»
М.В. Корняков



17» 01 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация Хоанг В.В. «Переработка рафинировочного шлака кремниевого производства с получением Al-Si сплавов» выполнена на кафедре металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

В 2019 г. окончил с отличием обучение в «Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации (филиал в г. Пенза) по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие» с присвоением квалификации «инженер».

В этом же 2019 году поступил на обучение в очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на кафедру металлургии цветных металлов.

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 2023 году.

Научный руководитель – Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», заведующая кафедрой металлургии цветных металлов.

На заседании присутствовали:

Кафедра металлургии цветных металлов:

1. Немчинова Нина Владимировна – заведующая кафедрой, д.т.н., профессор;
2. Аксенов Александр Владимирович – доцент каф., к.т.н., доцент;
3. Баранов Анатолий Никитич – профессор каф., д.т.н., профессор;
4. Бельский Сергей Сергеевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
5. Васильев Андрей Анатольевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
6. Зайцева Анна Александровна – ассистент каф.;

7. Кузьмина Марина Юрьевна – доцент каф., к.х.н., доцент;
8. Минеева Татьяна Султановна – доцент каф., к.т.н., доцент;
9. Никаноров Александр Витальевич – доцент каф., к.т.н.;
10. Петровский Алексей Анатольевич – доцент каф., к.т.н.;
11. Тютрин Андрей Александрович – доцент каф., к.т.н., доцент.

Институт заочно-вечернего обучения:

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

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

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

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Представленная Хоанг Ван Виеном диссертация обобщает самостоятельные исследования автора и является завершенным научным трудом, выполненным по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Актуальность темы диссертационного исследования. Тема, выбранная соискателем для исследования, является актуальной для дальнейшего развития научных основ металлургии цветных и черных металлов, в частности, повышения эффективности процесса извлечения кремния в виде силумина при переработке рафинировочного шлака – техногенного отхода кремниевого производства.

Целью работы соискателя явилась разработка технологии переработки рафинировочного шлака кремниевого производства с извлечением кремния в виде Al-Si сплава.

Основные научные результаты и их новизна

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность извлечения кремния в виде доэвтектического силумина из рафинировочного шлака кремниевого производства.

На основе термодинамического анализа трехкомпонентной диаграммы состояния шлакообразующей системы $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ установлено оптимальное соотношение содержания оксидов кремния и кальция (0,87–1,31) в шихте для извлечения кремния из рафинировочного шлака.

Определено влияние технологических параметров плавки шихты (температуры, содержания CaF_2 в составе флюсовой смеси фторида и оксида кальция, крупности частиц шлака) на извлечение кремния в Al-Si сплав и получена математическая модель процесса переработки шлака.

Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации, заключается в формулировке задач диссертационного исследования; в подготовке образцов рафинировочного шлака, кремния, и экспериментальных Al-Si сплавов для проведения различных аналитических исследований; разработке компьютерных программ для ЭВМ; выполнении необходимых расчетов; проведении лабораторных испытаний и математической обработке полученных результатов; обобщении результатов экспериментальных исследований; анализе и сопоставлении экспериментальных и теоретических данных;

подготовке научных публикаций и материалов для участия в конференциях и научно-технических мероприятиях; формулировке выводов, рекомендаций и заключения по работе.

Степень достоверности исследований полученных результатов подтверждена применением современных отработанных методик исследований и аттестованных измерительных приборов; современным метрологическим обеспечением оборудования лабораторий ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», центральной заводской лаборатории службы качества филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутского алюминиевого завода), лаборатории службы качества АО «Кремний», Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН; использованием апробированных современных компьютерных программ. Полученные результаты экспериментальных исследований не противоречат основам физико-химических взаимодействий компонентов и теории пирометаллургических процессов.

Практическая значимость.

Предложен способ получения силумина из техногенного сырья кремниевого производства – рафинировочного шлака (патент РФ на изобретение № 2785528).

Установлены оптимальные параметры переработки рафинировочного шлака для извлечения кремния в виде алюмокремниевого сплава: температура плавки – 1350–1400 °С, содержание CaF_2 в составе вводимой в шихту флюсовой смеси ($\text{CaF}_2 + \text{CaO}$) – 25 %, крупность частиц кремнийсодержащего шлака – 1,5 мм. Максимальное извлечение кремния составило ~ 75,8 %.

В результате проведенных экспериментов даны рекомендации по соотношению компонентов в шихте (алюминий – 70,6 %, шлак – 23,5 %, флюсы – 5,9 %) для извлечения кремния из рафинировочного шлака в виде силумина. Получены экспериментальные образцы Al-Si сплавов, отвечающие по структуре доэвтектическим силуминам (с содержанием кремния 2,75–9,27 % масс.).

Рекомендована технологическая схема получения металлургического кремния с организацией участка по переработке рафинировочного шлака с получением Al-Si сплавов. Условно-годовая экономия от отсутствия платы за размещение отходов IV класса опасности составляет 1,6546 млн. руб./год (при объеме производства кремния 27415,95 т в год, данные АО «Кремний» за 2022 г.). В целом извлечение кремния в процессе увеличилось до ~72,2 %.

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

*Соответствие диссертации паспорту специальности 2.6.2. **Металлургия черных, цветных и редких металлов:** № 1 (Рудное, нерудное, техногенное и энергетическое сырье); № 7 (Рециклинг материалов, переработка отходов производства и потребления); № 17 (Пирометаллургические процессы и агрегаты); № 20 (Металлургические шлаки и их использование).*

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на XXII Междунар. научно-практич. конф. «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2021» (г. Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 г.), Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С.С. Набойченко, «Современные технологии производства цветных металлов» (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.), Всерос. научно-практич. конф. с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов» (г. Иркутск, 20–22 апреля 2020 г., 20–21 апреля 2022 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. Немчинова, Н.В. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки / Н.В. Немчинова, **В.В. Хоанг**, И.И. Апончук // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 252–263.

2. **Хоанг, В.В.** Изучение механизма кристаллизации шлакообразующих систем, образующихся при рафинировании кремния / **В.В. Хоанг**, Н.В. Немчинова // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 1(40). – С. 4–11.

3. Немчинова, Н.В. Шлаки кремниевого производства / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, **В.В. Хоанг**, К.И. Жидков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №11 (125). – URL: <https://research-journal.org/archive/11-125-2022-november/10.23670/IRJ.2022.125.3> (дата обращения: 17.11.2022).

4. Тютрин, А.А. Математическая обработка результатов эксперимента по переработке рафинировочного шлака кремниевого производства / А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, **В.В. Хоанг**, Е.И. Савченко // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 4(43). – С. 15–22.

Статья в рецензируемом научном издании, входящем в международную реферативную базу данных Scopus

5. Nemchinova, N.V. Formation of Impurity Inclusions in Silicon when Smelting in Ore-Thermal Furnaces / N.V. Nemchinova, **V.V. Hoang**, A.A. Tyutrin // IOP conference series: materials science and engineering. – 2020. – Vol. 969. – No. 1. – P. 012038.

Патент

6. Пат. № 2785528, Российская Федерация, С22В 7/04; С22С 21/02; С22В 9/10 (2022.08). Способ выделения кремния из шлака кремниевого производства в виде сплава кремния и алюминия / Н.В. Евсеев, В.Ф. Аносов, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, **В.В. Хоанг**; заявитель и патентообладатель Евсеев Николай Владимирович. № заявки 2022112286, заявл. 06.05.2022; опубл. 08.12.2022. Бюл. № 34.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

7. Свидетельство № 2020666067, Российская Федерация, Расчет выхода и состава шлака при окислительном рафинировании кремниевого расплава / Н.В. Немчинова, **В.В. Хоанг**, А.А. Тютрин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИрННТУ. № заявки 2020665153, заявл. 27.11.2020; опубл. 04.12.2020.

8. Свидетельство № 2021667132, Российская Федерация, Расчет состава шихты для получения силумина с добавкой шлака кремниевого производства / Н.В. Немчинова, **В.В. Хоанг**, А.А. Тютрин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИрННТУ. № заявки 2021665813, заявл. 12.10.2021; опубл. 25.10.2021.

9. Свидетельство № 2022619785, Российская Федерация, Программа для расчета содержания кальцийсодержащих флюсов при переработке шлаков кремниевого производства / **В.В. Хоанг**, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИрННТУ. № заявки 2022618272/69, заявл. 06.05.2022; опубл. 26.05.2022.

Другие публикации

10. Немчинова, Н.В. Изучение структуры и химического состава образцов кремния металлографическим методом исследования / Н.В. Немчинова, **В.В. Хоанг**, А.А. Володькина // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы X Всерос. научно-практич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 22–24 апреля 2020 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. – С. 13–16.

11. **Хоанг, В.В.** Разработка в MS EXCEL алгоритма расчета выхода и состава шлака при окислительном рафинировании кремниевого расплава / **В.В. Хоанг**, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. – С. 76–79.

12. **Хоанг, В.В.** Разработка в PascalABC.NET программы расчета состава шихты для переработки шлаков кремниевого производства / **В.В. Хоанг**, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, А.В. Плакущий // *Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2021»*: труды XXII Междунар. научно-практич. конф. (г. Новокузнецк, 10-11 ноября 2021 г.). – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2021. – Ч. 1. – С. 141–146.

13. **Хоанг, В.В.** Обзор методов переработки шлаков кремниевого производства / **В.В. Хоанг**, А.А. Тютрин, Н.В. Евсеев // Молодежный вестник ИрГТУ, 2022. – Т. 12, № 1. – С. 35–40.

14. **Хоанг, В.В.** Изучение кристаллизации шлаков рафинирования кремния методами математического моделирования / **В.В. Хоанг**, Н.В. Немчинова // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. – С. 226–231.

15. **Хоанг, В.В.** Подбор флюсов для переработки шлаков кремниевого производства / **В.В. Хоанг** // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы X Всерос. научно-практич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2022. – С. 18–22.

16. Немчинова, Н.В. О способах рафинирования кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, **В.В. Хоанг**, Т.В. Будько // Молодежный вестник ИрГТУ, 2022. – Т. 12, № 4. – С. 924–934.

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 Хоанг Ван Виена на тему «Переработка рафинировочного шлака кремниевого производства с получением Al-Si сплавов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

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

Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 5 от 12 января 2023 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

