

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.307.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 20 апреля 2023 г. № 274

О присуждении **Хоанг Ван Виену**, гражданину Социалистической Республики Вьетнам, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Переработка рафинировочного шлака кремниевого производства с получением Al-Si сплавов» по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов принята к защите 03 февраля 2023 г. (протокол заседания № 65) диссертационным советом 24.2.307.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83 (Приказ от 02.11.2012 № 714/нк о создании совета, приказ от 24.03.2021 № 256/нк о возобновлении работы совета).

Соискатель Хоанг Ван Виен, 01 декабря 1994 года рождения.

В 2019 году соискатель окончил федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации (г. Санкт-

Петербург, филиал в г. Пенза) по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», является аспирантом кафедры «Металлургия цветных металлов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»).

Диссертация выполнена на кафедре «Металлургия цветных металлов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

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

Официальные оппоненты:

Бажин Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра металлургии, заведующий кафедрой (г. Санкт-Петербург);

Кузьмин Пётр Борисович, кандидат технических наук, ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Обособленное подразделение в г. Шелехов, начальник отдела литья (г. Шелехов).

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»)**, г. Красноярск, в своем положительном отзыве, подписанном Олейниковой Натальей Васильевной, доктором технических наук, доцентом, кафедра металлургии цветных металлов, профессором и утвержденном

Гуцом Денисом Сергеевичем, кандидатом психологических наук, доцентом, проректором по учебной работе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», указала, что диссертация Хоанг Ван Виен является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи переработки техногенных отходов производства металлургического кремния со снижением негативного воздействия на экосистему, имеющей значение для развития металлургии, что соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 статьи, в зарубежном издании – 1 работа, в сборниках научных трудов и материалах конференций опубликовано 7 работ, выданы 1 патент РФ на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Авторский вклад соискателя в научные публикации заключается в проработке известных теоретических и практических опубликованных данных по тематике диссертации, обработке результатов эксперимента, разработке компьютерных программ, оформлении и подготовке материалов к публикации; вклад составляет 86 %. Объем научных статей – 3,6 печатных листа.

В опубликованных работах представлены результаты по изучению химического состава, свойств объекта исследований (образцов шлаков АО «Кремний» объединенной компании РУСАЛ) и технологии переработки рафинировочного шлака кремниевого производства с целью извлечения кремния в виде Al-Si сплава. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значительные работы:

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).

4. Тютрин, А.А. Математическая обработка результатов эксперимента по пере-работке 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.

5. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущая организация ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Замечания: 1) Несомненно, что соискатель провел большую работу по изучению научно-технической литературы по рассматриваемой проблеме, однако, в аналитических обзорах не отражены данные, по которым можно было бы провести сравнение способов переработки кремнийсодержащего сырья, в том числе техногенного – рафинировочного шлака. По сути, автор

перечисляет способы, предложенные теми или иными разработчиками, но не дает количественных подтверждений их преимуществ или недостатков. 2) В работе приводится объемное описание проводимых аналитических работ, а также подробно расписаны этапы математического и имитационного моделирования. Однако очень мало внимания уделяется проработке технологической схемы. По сути, приведена блок-схема переработки шлака (рис. 4.12) без описания условий осуществления основных (частично) и вспомогательных операций, нет аппаратурно-транспортной схемы и расчета основного и вспомогательного оборудования, нет объемно-планировочных решений. Не приведены материальный и тепловой балансы процесса, нет составов газовой фазы, что в условиях использования углеродных восстановителей является актуальным фактором. 3) В соответствии с замечанием, изложенным в п. 2, вызывают сомнение результаты упрощенных экономических расчетов. Так, автор приводит экономию за счет снижения платежей за размещение твердых отходов, однако не указывает, что выбросы углеродсодержащих газов увеличатся, и не показывает, какие затраты будут связаны с этим увеличением. 4) В табл. 4.5 приведена ориентировочная себестоимость получения 1 тонны кремния на действующем производстве. Автор, отталкиваясь от этой цифры, приводит себестоимость с учетом вводимых усовершенствований, но учитывает в себестоимости предлагаемого варианта только снижение платы за размещение техногенных отходов. При этом автором не учитывается, что в эксплуатацию вводится значительное количество оборудования, а амортизационные отчисления остаются без изменений. То же самое можно сказать о дополнительном количестве электроэнергии, о расходе углеродистых материалов, воды и проч. Подобные вычисления можно сделать только после проработки материального и теплового балансов, расчеты которых автор не приводит. 5) На стр. 134 диссертации указан объем образующегося рафинировочного шлака 2,5 тонны в год, что противоречит данным, приведенным на стр. 6 (2,4–2,5 тыс. тонн в год). В соответствии со сказанным расчеты по формуле

(4.1) на стр. 134–135 представляются некорректными. б) В расчетах по формуле (4.2) используется производительность предприятия по продукту. В формулу подставлено значение производительности действующего предприятия. Было бы справедливым преобразовать данное выражение для учета производительности, которая по проекту увеличивается на 2–2,5 %.

2. Официальный оппонент Бажин Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра металлургии, заведующий кафедрой (г. Санкт-Петербург).

Замечания: 1) Существуют проблемы при переплаве шлака из-за существенной разницы по плотности с расплавом, поэтому, не понятно как они решаются с технической точки зрения и выхода годного продукта (Al-Si сплава). 2) На страницах 13, 26, 48, 57, 59, 89, 104 имеются опечатки и неточности формулировок. 3) Какова экономическая составляющая технических предложений. 4) Не понятно, для чего, для данной технологии такое количество Свидетельств на программу ЭВМ, ведь работа технологическая. 5) Данные выводов №3 и №5 не совсем согласуются с заявленными результатами, полученными в ходе лабораторных испытаний.

3. Официальный оппонент Кузьмин Пётр Борисович, кандидат технических наук, ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Обособленное подразделение в г. Шелехов, начальник отдела литья (г. Шелехов).

Замечания: 1) В главе 1 имеются общие обзоры и описания, не относящиеся непосредственно к теме работы. Например, анализ мирового производства кремния, его экспорта и импорта или таблицы с требованиями ГОСТ и ТУ к химическому составу кремния. 2) В главе 4 (раздел 4.1) автор с помощью программы «ProCAST 2013» рассчитывает и сравнивает свойства промышленного сплава 4043 и экспериментального силумина с содержанием 5,79 % кремния. Непонятно, зачем сравнивать два одинаковых по содержанию кремния сплава с получением заведомо одинаковых результатов.

И в диссертации нет данных, какой полный химических состав сплавов принят для расчёта в том и другом сплаве. Содержание некоторых примесей (например железа) или их определённое сочетание может кардинально изменить свойства сплава. 3) Имеются замечания к рекомендации автора относительно использования полученных силуминов в литейных отделениях алюминиевых заводов. В частности, на примере Филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (ИркАЗа), который расположен на одной промышленной площадке с АО «Кремний», замечания следующие:

– возникнут технологические и организационные сложности с использованием сплавов разного химического состава (содержание Si в экспериментальных силуминах варьируется от 2,2 до 9,2 %);

– в экспериментальных силуминах содержание Fe как основной вредной примеси составляет 0,30 – 0,35 %, что значительно выше ограничения содержания Fe в литейных сплавах производства ИркАЗа – не более 0,12 % или не более 0,10 %;

– литейные производства алюминиевых заводов в целом рассчитаны на использование жидкой шихты и только на небольшие добавки твёрдой.

Учитывая сказанное, потребителями указанных вторичных силуминов могли бы стать предприятия вторичной металлургии или литейные цеха машиностроительных заводов. 4) В диссертации не сказано, сколько всего силумина может быть получено при переработке 2500 т/год рафинировочного шлака, а такой итоговый показатель был бы интересен. 5) Встречаются незначительные опечатки и погрешности оформления. В двух случаях не соблюдены правила переноса таблиц (таблицы 2.6 и 2.8) и подрисовочные подписи оторваны от самих рисунков (рисунки 2.11 и 2.14).

Отзывы на автореферат:

1. Зобнин Николай Николаевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Металлургия и материаловедение», НАО «Карагандинский индустриальный университет», Республика Казахстан, г. Темиртау. *Замечания:* 1) В таблице 4, стр.13 автореферата желательно кроме

извлечения кремния указать извлечение алюминия в сплав, т.к. из текста реферата видно, что этот компонент может окисляться и переходить в отвальный шлак в процессе плавки. Между тем, алюминий является также весьма ценным составляющим шихты и его извлечение в готовый продукт должно также иметь значение при выборе оптимальных параметров процесса.

2) Для эксперимента, проведенного в оптимальных условиях, желательно представить в автореферате полный баланс плавки по основным компонентам (алюминий, кремний). При этом, чтобы обеспечить точное схождение статей прихода и расхода, лучше отдельно для этого эксперимента сделать анализ продуктов плавки и исходного сырья, т.к. вариативность состава шлака рафинации может не позволить сойтись балансу плавки по элементам.

3) Везде по тексту автореферата, где упоминается факт того, что условно-годовая экономия при отсутствии платы за размещение отходов IV класса опасности, которая составила 1,6546 млн. руб./год, рекомендуется внести уточнение касательно того, учитывает ли этот расчёт образование вторичного шлака, а также то, что вторичный шлак используется в чёрной металлургии и не требуется его размещение в отвалах.

4) По тексту автореферата диссертации рекомендуется указать, какая из металлургических фаз (металл или шлак) осела на дно, а какая всплыла на поверхность, т.к. это важно для практического использования технологии.

2. Шепелев Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, директор, научно-исследовательская организация «Экологический Инжиниринговый Центр ООО «ЭКО – Инжиниринг», г. Ачинск. *Замечание:* Отсутствие в тексте автореферата пояснений, на чем основано утверждение о получении адекватной математической модели переработки рафинировочного шлака кремниевого производства.

3. Суздальцев Андрей Викторович, доктор химических наук, заведующий лабораторией и **Гевел Тимофей Анатольевич**, младший научный сотрудник, Научная лаборатория электрохимических устройств и материалов, Научно-исследовательский институт водородной энергетики

Химико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Замечания: 1) Стр. 11. Подтверждено ли «активное» окисление алюминия повышением его содержания во вторичном шлаке? Почему не рассматривается «активное» окисление кремния? 2) Оценивали ли долю сопутствующего процесса алюминотермического восстановления SiO_2 из шлака в алюминий? 3) Какие оптимизационные эксперименты требуются перед масштабированием разработанного способа, по мнению автора?

4. Воинков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, начальник и **Мальцев Геннадий Иванович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист, Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма. *Замечания:* 1) Обычно приводят температуру эвтектики с точностью до целого градуса или до десятичного знака после запятой. На рис. 5 автореферата указаны значения точек эвтектики с точностью до сотых долей градуса. За счет чего получена такая точность в определении температур эвтектики? 2) Насколько значима величина выхода сплава, равная 81,79 %, На рис. 5? Вполне вероятно, что зависимость выхода сплава от температуры в диапазоне 1200–1500 °С является величиной монотонно убывающей?

5. Чемезов Олег Владимирович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры металлургии цветных металлов Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. *Замечания:* 1) Средняя стоимость силумина в 2 раза ниже, чем средняя стоимость алюминия. Из автореферата ясно, что часть металлического Al в ходе предложенного вами процесса переходит в корунд (рис.13). Какая доля алюминия из исходной шихты окисляется и теряется в ходе процесса? 2) Рис. 10 графики б и в необходимо поменять местами. Из тенденций, наблюдаемых на рисунках 10 и 11 можно сделать вывод, что повышение концентрации CaF_2 выше 25% в рафинировочном шлаке явно даст повышение

извлечения кремния в сплав силумина. Почему не поставлены эксперименты с более высокими концентрациями CaF_2 выше 25%? Какая концентрация CaF_2 на рис. 11 во второй колонке (41,3% извлечения Si в сплав)?

6. Харченко Александр Сергеевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой и **Потапова Марина Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлургии и химических технологий, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» г. Магнитогорск. *Замечания:* 1) Как определили, что выбранный размер частиц кремниевого шлака в 1,5 мм является оптимальным при пирометаллургической переработке? 2) В своих экспериментах в качестве покровного флюса автор добавляет смеси хлоридов натрия и калия в шихту плавки с строго определенном количестве 6 г. Поясните, в каких пределах может варьироваться расход флюса?

7. Зайков Юрий Павлович, доктор химических наук профессор, научный руководитель и **Шмыгалев Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник ЛЭВГ, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург. *Замечания:* 1) В разделе «Материалы и методы исследования» наряду с методами исследования шлаков следовало также указать методы синтеза силуминов с использованием шлака. 2) На стр. 9 не совсем ясно, в чем заключается предложенная автором методика термодинамического анализа механизма формирования эвтектических включений при кристаллизации трехкомпонентного ($\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$) шлакового расплава. Чем она отличается от известных? 3) На стр. 9 сообщается об экспериментальном выборе флюсов для снижения вязкости. Какие составы флюсов и какие методы определения вязкости были использованы при выборе? 4) На стр. 9. с чем связано превышение содержания SiO_2 в исходном рафинировочном флюсе относительно требуемого? 5) На стр. 10 для лучшего представления

следовало указать состав шихты и соотношение реагентов в ней. б) В чем заключается дальнейшая работа по оптимизации состава флюса и параметров переплава? Планируется ли масштабирование разработанного способа?

8. Рогожников Денис Александрович, доктор технических наук профессор, заведующий лабораторией, и **Дизер Олег Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Научная лаборатория перспективных технологий комплексной переработки минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. *Замечания:* 1) Оказывают ли негативное влияние примеси карбидов кремния, находящиеся в исходном рафинировочном шлаке, на процесс получения силуминовых сплавов? Существует ли вероятность образования карбидных включений в структуре сплава? 2) В тексте автореферата отсутствует полный химический анализ получаемого Al-Si сплава. 3) Каким образом можно вовлекать получаемый по предлагаемой технологии (рис. 14) вторичный шлак в черную металлургию?

9. Антропова Инна Германовна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией химии и технологии природного сырья, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ. *Замечание:* Видите ли вы пути повышения эффективности основного производства с целью уменьшения потерь кремния со шлаком, ведь внедрение дополнительного пиро-процесса для доизвлечения ценного составляющего из отходов - довольно дорогостоящее мероприятие.

10. Богатырева Елена Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры Цветных металлов и золота, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва. *Замечания:* 1) Стр. 9. Следовало привести более подробно методику термодинамического анализа механизма формирования эвтектических

включений при кристаллизации трехкомпонентного ($\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$) шлакового расплава. 2) Стр. 11, рис. 7. Какова степень перехода фтора в газовую фазу и способы его утилизации? 3) Стр. 14, рис. 11. Чем объясняется существенное повышение извлечение кремния из рафинировочного шлака в силумин при увеличении содержания фторида кальция в флюсе до 25%?

11. Аникин Александр Ефимович, кандидат технических наук, доцент, ООО «КМК-Энерджи», заместитель директора по техническим вопросам, г. Новокузнецк. *Замечания:* 1) В технологической схеме (рисунок 14) микросилика, получаемая в процессе мокрой газоочистки газов, выходящих из РТП, направляется на шламовое поле. Почему не рассмотрены варианты ее дальнейшего использования? 2) В технологической схеме (рисунок 14) вторичный шлак, полученный в процессе плавки рафинировочного шлака с добавками в высокотемпературной печи, направляется на нужды черной металлургии. Какие процессы черной металлургии являются потребителями данного шлака?

Все отзывы положительные.

В отзывах отмечены актуальность выбранной темы исследования, научная новизна работы, а также практическая значимость полученных результатов исследования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области переработки техногенного сырья металлургического производства с целью извлечения металла и получения товарной кремнийсодержащей продукции для применения в различных областях, наличием научных разработок, публикаций в рецензируемых изданиях по выполненным исследованиям, близким к проблеме работы соискателя, вкладом в развитие экологически чистых и малоотходных технологий переработки техногенных отходов металлургического производства и, таким образом, способностью определить

научную и практическую ценность диссертации, а также отсутствием совместных проектов, печатных работ.

В качестве примера публикаций, близких к тематике работы соискателя, можно привести следующие работы:

1. Vasyunina, N.V. Recovery of silicon and iron oxides from alumina-containing sweepings of aluminum production / N.V. Vasyunina, I.V. Dubova, S.V. Belousov, A.V. Morenko, K.E. Druzhinin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59. – No. 3. – P. 230–236. <https://doi.org/10.3103/S1067821218030148>.

2. Illarionov, I.E. Technology for modifying aluminum alloys with ultrafine silicon / I.E. Illarionov, T.A. Bogdanova, T.R. Gilmanshina, G.A. Merkulova, A.Y. Bogdanov // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62. – No. 5-6. – P. 476–481. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0684-0>.

3. Glazev, M.V. Environmental technologies in the production of metallurgical silicon / M.V. Glazev, V.Yu. Bazhin // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. – 2020. – С. 114–119. – <https://doi.org/10.1201/9781003017226-17>.

4. Glazev, M.V. Refractory materials of metallurgical furnaces with the addition of silicon production waste / M.V. Glazev, V.Yu. Bazhin // Non-ferrous Metals. – 2022. – No. 1. – P. 45–58. <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.01.05>.

5. Kuz'min, M.P. Obtaining of Al–Si foundry alloys using amorphous microsilica – Crystalline silicon production waste / M.P. Kuz'min, K.C. Paul, M.Q. Abdul, L.M. Larionov, M.Yu. Kuz'mina, P.B. Kuz'min // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 806 – P. 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.312>.

6. Kuz'min, M.P. Possibilities and prospects for producing silumins with different silicon contents using amorphous microsilica / M.P. Kuz'min, M.Yu. Kuz'mina, P.B. Kuz'min // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2020. – Vol. 30, No. 5. – P. 1406–1418. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65306-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65306-7).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая научная идея получения кремния в виде силумина в результате пирометаллургической переработки рафинировочного шлака кремниевого производства при добавлении в шихту флюсов и поддержании температурного режима плавки, определенных на основе изучения диаграммы состояния $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$,

предложен нетрадиционный подход переработки кремнийсодержащего рафинировочного шлака, заключающийся в извлечении ценного элемента в виде силумина при плавке шихты,

доказана перспективность использования научной идеи получения кремния в виде силумина при переработке кремнийсодержащего техногенного сырья с получением продуктов (Al-Si сплавов), пригодных для дальнейшего использования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны научные положения о термодинамических закономерностях получения алюмокремниевых сплавов при переработке рафинировочного шлака, вносящие вклад в расширение представлений о процессах пирометаллургического рафинирования,

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс существующих методов исследования, моделирование физико-химических взаимодействий компонентов шихты и математическая обработка результатов эксперимента для установления закономерностей влияния состава шихты (соотношения содержания Al, шлака и флюсов) и условий плавки на извлечение кремния в алюмокремниевый сплав,

изложены факторы и термодинамические условия для выделения кремния из шлака (соотношение $\text{SiO}_2/\text{CaO} = 0,87\text{--}1,31$) на основе изучения

трехкомпонентной диаграммы состояния шлакообразующей системы $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$,

раскрыты условия для решения проблемы расплавления шихты для максимального перехода кремния из расплава в алюмокремниевый сплав, заключающиеся в выборе оптимального температурного режима плавки и состава флюсов,

изучены факторы, способствующие минимизации окисления алюминия при плавке шихты,

проведена модернизация алгоритма математической модели пирометаллургического процесса, позволяющей получить новые результаты по влиянию температуры, количества фторида кальция по отношению к оксиду кальция во флюсовой смеси, крупности частиц шлака на максимальное извлечение кремния в Al-Si сплав.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и опробована в лабораторном масштабе технология получения алюмокремниевых сплавов при переработке рафинировочного шлака кремниевого производства; результаты диссертационной работы были внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» при подготовке обучающихся по направлению «Металлургия»,

определены перспективы использования предложенной технологической схемы с дополнительной стадией переработки рафинировочных шлаков при промышленном производстве металлургического кремния,

создана система практических рекомендаций по соотношению компонентов в шихте для переработки кремниевого шлака с получением Al-Si сплавов, соответственно: алюминий – 70,6 %, шлак – 23,5 %, флюсы – 5,9 %,

представлены рекомендации для дальнейших исследований по совершенствованию технологии пирометаллургической переработки рафинировочного шлака кремниевого производства.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты исследований подтверждаются использованием современного, апробированного оборудования, аттестованных физико-химических методов анализа, применением современных средств измерений, математической обработкой результатов эксперимента,

теория построена на известных и проверенных данных и согласуется с экспериментальными результатами по получению алюмокремниевых сплавов при пирометаллургической переработке кремниевого шлака, а также с опубликованными материалами по теме диссертации,

идея базируется на основных положениях теории пирометаллургических процессов, научном обобщении передового опыта и анализе теории и практики российских и иностранных исследователей в области переработки техногенного сырья кремниевого производства,

использованы данные, полученные ранее другими исследователями, по фазово-химическому составу рафинировочного шлака кремниевого производства и способам восстановления кремния из шлака, и проведено их сравнение с полученными автором экспериментальными результатами,

установлено качественное совпадение авторских результатов исследования с результатами, представленными в научной литературе по пирометаллургической переработке кремнийсодержащего техногенного сырья,

использованы современные методики, средства контроля и измерений, сбора и обработки исходных и экспериментальных данных: рентгеноспектральный микроанализ, металлографический, рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный методы анализа, сканирующая электронная микроскопия, математическая обработка экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в: формулировке задач диссертационного исследования; подготовке образцов рафинировочного шлака, кремния и экспериментальных Al-Si сплавов для проведения 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 различного уровня; формулировке выводов, рекомендаций и заключения по работе.

В ходе защиты диссертации были высказаны критические замечания, касающиеся отсутствия пояснений об окислении алюминия (при переработке шлака) и формах его перехода во вторичный шлак, о причине выбора шлакообразующих компонентов в качестве основных и об обоснованной рекомендации выбора крупности частиц шлака для плавки.

Соискатель Хоанг Ван Виен подробно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и аргументированно объяснил о неизбежном окислении алюминия ввиду высокого его сродства к кислороду, в результате которого он переходит во вторичный шлак в виде Al_2O_3 , что подтверждается рентгенофазовым методом анализа пробы вторичного шлака. Соискатель Хоанг Ван Виен привел собственную аргументацию на высказанные замечания о выборе типа и количества шлакообразующих добавок, заключающуюся в обосновании применения фторида и оксида кальция, которые позволяют получить состав шлака с более низкими температурой плавления и вязкостью, что способствует повышению извлечения кремния в сплав. Также соискатель дал аргументированное объяснение о выбранной оптимальной крупности частиц шлака кремниевого производства (1,5 мм) для более полного контакта кремния с алюминием ввиду развитой поверхности частиц, что подтверждено наибольшим извлечением кремния в сплав.

На заседании 20 апреля 2023 г. диссертационный совет принял решение за новые научно обоснованные технологические разработки, направленные на решение проблем переработки рафинировочного шлака кремниевого производства с получением алюмокремниевых сплавов, что имеет существенное значение для развития металлургической отрасли, присудить **Хоанг Ван Виен** ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **20** человек, из них **6** докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **20**, против **0**, недействительных бюллетеней **0**.

Председательствующий на заседании диссертационного совета, заместитель председателя диссертационного совета, д.т.н., профессор



Пономарев
Борис Борисович

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

Вулых
Николай Валерьевич

Дата оформления заключения 21 апреля 2023 г.