

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 24.1.045.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 30 марта 2022 г., № 5
о присуждении **Суздальцеву Андрею Викторовичу**, гражданину РФ,
ученой степени доктора химических наук.

Диссертация «Электродные процессы при получении алюминия и его лигатур в расплавах на основе системы $KF-AlF_3-Al_2O_3$ » по специальности 2.6.9.Технология электрохимических процессов и защита от коррозии принята к защите 24 декабря 2021 г., протокол № 6, диссертационным советом Д24.1.045.01, созданным на базе ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН (ИВТЭ УрО РАН), 620990, г.Екатеринбург, ул.Академическая, 20; приказ № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Суздальцев Андрей Викторович, 1982 года рождения, в 2004 году окончил ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет-УПИ», в 2011 году защитил диссертацию по теме «Анодные процессы на углероде в расплаве $KF-AlF_3-Al_2O_3$ » на соискание ученой степени кандидата химических наук в диссертационном совете Д 004.002.01 на базе ИВТЭ УрО РАН,
работает ведущим научным сотрудником ИВТЭУрО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории электродных процессов ИВТЭ УрО РАН.

Научный консультант – доктор химических наук, профессор **Зайков Юрий Павлович**, научный руководитель ИВТЭ УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Кушхов Хасби Билялович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова;

Сабирзянов Наиль Аделевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией химии гетерогенных процессов Института химии твердого тела УрО РАН;

Шубин Алексей Борисович, доктор химических наук, заведующий лабораторией физической химии металлургических расплавов Института металлургии УрО РАН, *дали положительные отзывы на диссертацию.*

Ведущая организация ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» в своем положительном заключении, подписанном Тарасовым Вадимом Петровичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой цветных металлов и золота, отметила существенный вклад результатов и выводов работы в расширение фундаментальных представлений в области высокотемпературной электрохимии расплавленных солей и в разработку основ новой, ресурсосберегающей и энергоэффективной, импортозамещающей технологии производства алюминиевых лигатур.

Соискатель имеет более **115** опубликованных работ по теме диссертации, в том числе, **32 статьи** в рецензируемых научных изданиях (доля авторского права в каждой не менее 40%). Получено **7 патентов** Российской Федерации и оформлена **1** Международная заявка на изобретение.

Наиболее значимые научные работы:

1. Суздальцев, А.В. Углеродный электрод для электрохимических исследований в криолит-глиноземных расплавах при 700 - 960°C / А.В. Суздальцев, А.П. Храмов, Ю.П. Зайков // Электрохимия. – 2012. – Т. 48. – №12. – С. 1251-1263. – DOI: 10.1134/S1023193512120117.

2. Suzdaltsev, A.V. Review-Synthesis of aluminum master alloys in oxide-fluoride melts: A review / A.V. Suzdaltsev, P.S. Pershin, A.A. Filatov, A.Yu. Nikolaev, Yu.P. Zaikov // Journal of the Electrochemical Society. – 2020. – V. 167(10). – № 102503. – DOI: 10.1149/1945-7111/ab9879.

3. Suzdaltsev, A.V. Towards the stability of low-temperature aluminum electrolysis / A.V. Suzdaltsev, A.Yu. Nikolaev, Yu.P. Zaikov // Journal of the Electrochemical Society. – 2021. – V. 168(4). – № 046521. – DOI: 10.1149/1945-7111/abf87f.

На автореферат прислали положительные отзывы:

1. Кандидаты технических наук **Якорнов С.А.**, заместитель технического директора по металлургии – начальник управления стратегического планирования, и

Краюхин С.А., главный специалист управления повышения эффективности производства ОАО «УГМК», г. Верхняя Пышма. Задан вопрос и сделаны замечания:

- Какой фактор (i_k , расположение катода) больше влияет на выход по току?
- Нет данных по влиянию перемешивания алюминия на восстановление оксидов.
- Нет технико-экономической оценки предложенного способа производства лигатуры.

2. Доктор химических наук **Кухтин Б.А.**, профессор кафедры химии Владимирского государственного университета:

- Каковы доли вкладов стадий анодного процесса в перенапряжение?

3. Доктор технических наук **Бутрим В.Н.**, главный металлург АО «Композит», г. Королев:

- Как отразится замена катода на алюминиевый на параметрах катодного процесса?
- Насколько реально опытно-промышленное внедрение разработанной технологии?

4. Доктор химических наук **Лебедев В.А.**, профессор кафедры «Металлургии цветных металлов» УрФУ, и кандидат химических наук **Чемезов О.В.**, доцент той же кафедры, г. Екатеринбург:

- Не обосновано применение расплава, содержащего NaF, для получения лигатур.
- Как соотносятся скорости реакции Будуара и электрохимической десорбции C_xO ?
- От чего зависит степень заполнения поверхности С-электрода кислородом?

5. Доктор химических наук **Гаркушин И.К.**, профессор кафедры общей и неорганической химии Самарского государственного технического университета:

- Оценивали ли константы реакций обмена в системе $KF-AlF_3-Al_2O_3-K_2O$?
- В системе $KF-NaF-AlF_3-Al_2O_3$ также возможны реакции обмена.
- Проводился ли расчет возможности протекания реакций (14)-(19) (стр. 29)?

6. Доктор технических наук **Бродова И.Г.**, главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург:

- Каковы состав и размеры интерметаллидов в синтезируемых лигатурах?
- Проверялась ли модифицирующая способность лигатуры Al-Sc? На каких сплавах?

7. Доктор технических наук **Шешуков О.Ю.**, директор Института новых материалов и технологий УрФУ, г. Екатеринбург:

- С какой целью изучалось влияние LiF и NaF на кинетику электродных процессов?
- Можно ли исключить экранировку катода, снижая отношение $[KF]/[AlF_3]$ в расплаве?

8. Доктор химических наук **Дресвянников А.Ф.**, заведующий кафедрой технологии электрохимических производств Казанского национального исследовательского технологического университета:

- Что понимается под разным составом ионов алюминия?
- Какие участки катода из разных материалов имеются ввиду?
- Меняется ли состав «твердой соли» на катоде при изменении условий электролиза?

9. Доктор технических наук **Немчинова Н.В.**, заведующий кафедрой «Металлургия цветных металлов» Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск:

- Словосочетание «электролизные испытания» на стр. 26 и 37 не совсем удачное.
- Проводилась ли технико-экономическая оценка предлагаемой технологии?

10. Кандидат химических наук **Черник А.А.**, заведующий кафедрой технологии электрохимических производств и материалов электронной техники Белорусского государственного технологического университета, и доктор химических наук **Мурашкевич А.Н.**, профессор той же кафедры, г. Минск. Без вопросов и замечаний.

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации.

Оппоненты являются признанными специалистами в области физической химии и электрохимии расплавленных солей (Х.Б. Кушхов), физико-химических процессов при извлечении оксидов редкоземельных металлов из вторичного сырья и синтезе лигатур алюминия (Н.А. Сабирзянов), термодинамики и физической химии процессов, связанных с получением сплавов алюминия с редкоземельными металлами (А.Б. Шубин). Ведущая организация Национальный исследовательский технический университет «МИСиС» - один из мировых лидеров в области научно-практических разработок, направленных на установление физико-химических закономерностей процессов при синтезе сплавов и композиционных материалов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований

разработаны научные основы новой энергоэффективной и ресурсосберегающей технологии непрерывного производства лигатур алюминия из оксидного сырья при электролизе расплавов на основе системы $KF-AlF_3-Al_2O_3$;

предложены пути реакций, протекающих при электролизе расплавов на основе $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, которые учитывают на аноде стадии переноса заряда с образованием промежуточного адсорбированного соединения и его последующей электрохимической и физической десорбции, а на катоде – разряд алюминийсодержащих оксидно-фторидных и фторидных ионов, приводящий к изменению состава и повышению температуры ликвидуса расплава в прикатодном слое, кристаллизации твердой фазы и частичному экранированию электрода;

доказана на примере Al-Sc возможность масштабирования предложенной технологии непрерывного получения лигатур алюминия при электролизе расплава $\text{KF-NaF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ с периодическими добавками оксида легирующего элемента в укрупненном лабораторном электролизере.

Теоретическая значимость исследования:

доказано, что при электролизе исследованных расплавов с твердыми электродами скоростьопределяющими являются процессы массопереноса, связанные с релаксацией равновесия между электроактивными ионами в приэлектродных слоях;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных методов физико-химического анализа: потенциометрия, измерение поляризации в стационарных условиях, циклическая вольтамперометрия, хронопотенциометрия, гальваностатический электролиз, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, рентгенофазовый анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния света, сканирующая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, метод карботермического восстановительного плавления;

изучены факторы, определяющие скорость электродных процессов при электролизе расплавов на основе системы $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$: состав расплава (концентрация Al_2O_3 , LiF , NaF , мольное отношение $[\text{KF}]/[\text{AlF}_3]$), параметры электролиза (температура, плотность тока, режим поляризации);

раскрыта с помощью модельного описания связь поляризационных зависимостей, характеризующих кинетику анодных процессов на углероде и платине в стационарном и нестационарном режимах, с составом оксидно-фторидного расплава и условиями электролиза;

изложены представления о физико-химических процессах, протекающих при контакте оксида легирующего элемента с алюминием в расплаве $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, показывающие необходимость электролитического разложения оксидов для повышения извлечения легирующего элемента и организации непрерывного получения лигатур алюминия.

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

разработаны оригинальные конструкции алюминиевого и газового CO/CO_2 электродов сравнения, которые отличаются от имеющихся простотой изготовления, повышенной точностью, продолжительным сроком службы и могут применяться не только для электрохимических измерений, но и для контроля производственных процессов в оксидно-фторидных алюминийсодержащих расплавах;

определены условия электровосстановления легирующих элементов и алюминия на твердом катоде из расплава $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ с добавками Sc_2O_3 , ZrO_2 , B_2O_3 и SiO_2 при 750°C : 0 – 0.4 В и до 0.4 A/cm^2 для алюминия; 0.6-0.8 В и до 0.3 A/cm^2 для бора; 0.55-0.15 В и до 0.1 A/cm^2 для кремния; 0-0.2 В и до 0.5 A/cm^2 для циркония; -0.5-0.7 В и до 0.7 A/cm^2 для скандия;

представлены принципиальная и аппаратная схемы непрерывного электролитического производства лигатуры Al-Sc.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены на современном сертифицированном оборудовании (гальваностат-потенциостат AutoLab 302N с ПО NOVA 1.11 (Metrohm, Нидерланды), высокотемпературные печи шахтного типа, регулируемые термопарами и термодарным модулем USB-TC01 (National Instruments, США), оптический эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo, анализатор кислорода/водорода OH836 (LECO, США), рентгеновский дифрактометр Rigaku D/MAX-2200VL/PC (Rigaku, Япония), сканирующий электронный микроскоп JSM-5900LV (Jeol, Япония) с системами волнодисперсионного микроанализа INCA Energy 250, INCA Wave 500 (Oxford Instruments, Великобритания), рамановский микроскоп-спектрометр U 1000 (Renishaw, Англия) с проведением необходимой

калибровки измерительных приборов, что обеспечило хорошую воспроизводимость и согласованность данных;

установлено количественное совпадение результатов, полученных с помощью различных физико-химических методов анализа, и их соответствие теоретическим принципам и фундаментальным представлениям в области высокотемпературной физической химии и электрохимии.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследования, выборе методов и методик анализа, анализе литературных данных, планировании и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных.

В соответствии с **паспортом специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии** в работе изучены процессы на границах электрод/оксидно-фторидный расплав и способы управления этими процессами.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования специалистам, работающим в области получения сплавов и композиционных материалов на основе легких металлов, в частности, во Всероссийском институте авиационных материалов, Институте металлургии и материаловедения РАН им. А.А. Байкова, Национальном исследовательском техническом университете «МИСиС», а также предприятиям и организациям металлургической, аэрокосмической и атомной отраслей (ОК РУСАЛ, ГК Роскосмос, ГК Росатом).

В ходе защиты диссертации были высказаны критические замечания по поводу недостаточного освещения в докладе разработанных автором модельных представлений и необходимости в дальнейшем более глубоко изучить распределение и степень дисперсности интерметаллидов легирующего компонента в алюминии.

Соискатель Суздальцев А.В. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и согласился с высказанными замечаниями.

На заседании **30 марта 2022 г.** диссертационный совет постановил: за разработку научных основ новой ресурсосберегающей и энергоэффективной технологии производства алюминиевых лигатур электролизом оксидно-фторидных расплавов присудить Суздальцеву А.В. ученую степень доктора химических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **21**

человека, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» 20, «против» - 0, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя совета

доктор химических наук



Степанов Виктор Петрович

Ученый секретарь совета

кандидат химических наук



Кулик Нина Павловна

01.04.2022

Подписи Степанова В.П. и Кулик Н.П. заверяю
Ученый секретарь ИВТЭ УрО РАН к.х.н.



А.О. Кодинцева