

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертационную работу Николаева Андрея Юрьевича «Получение лигатур алюминий-скандий в расплавах KF-NaF-AlF<sub>3</sub>-Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии**

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН. Работа состоит из введения, основной части, включающей три главы, посвященных методике проведения электрохимических измерений и электролиза, обсуждению результатов изучения катодного процесса в легкоплавких оксидно-фторидных расплавах KF-AlF<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и KF-NaF-AlF<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с добавками Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с целью выбора параметров получения лигатур Al-Sc при электролизе, выводов и списка литературы. Материал изложен на 116 страницах, содержит 65 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 111 наименований, включающий современные работы отечественных и зарубежных исследователей. По структуре и объему работа соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация написана логичным и грамотным научным языком, хорошо оформлена. В целом представленная работа характеризуется последовательностью изложения и внутренним единством, содержит четко поставленную цель и логично выстроенные задачи для ее осуществления. Полученные результаты и их представление свидетельствует о высокой квалификации проделанной А.Ю. Николаевым работы. Автореферат диссертационной работы и опубликованные работы достаточно полно отражают ее содержание.

### **Актуальность темы и направления исследования**

В настоящее время многие отечественные предприятия алюминиевой промышленности испытывают трудности, поскольку при росте цен на ресурсы

спрос на первичный алюминий снижается. С другой стороны, наблюдается тенденция повышения спроса на multifunctional сплавы и композиционные материалы на основе легких металлов со стороны аэрокосмической отрасли, судостроения, роботостроения, автомобилестроения и новых передовых технологий. Благодаря легирующим металлам или дисперсно-упрочняющим соединениям, эксплуатационные характеристики таких сплавов и материалов могут улучшаться на порядки. Так, небольшие добавки скандия в алюминий модифицирует его структуру и технологические свойства. Известно, что легирование алюминиевых сплавов скандием в количестве до 0.2 мас.% увеличивает прочность на 40%, пластичность на 50%, коррозионную стойкость – в 10 раз, температурный интервал устойчивой работы сплавов возрастает на 100-500°C.

Несмотря на то, что сплавы со скандием обладают сочетанием уникальных свойств, использование их очень ограничено из-за высокой стоимости лигатуры Al-Sc с содержанием 2 мас.% скандия, получаемой преимущественно алюминотермическим восстановлением дорогостоящих солей скандия с высокими потерями последних. По этой причине актуальны исследования, направленные на разработку новых способов производства лигатур Al-Sc с использованием оксида скандия.

В связи с этим, работа А.Ю. Николаева, направленная на разработку научно-практических основ технологии получения лигатур Al-Sc при электролизе легкоплавких расплавленных электролитов на основе системы  $KF-AlF_3$  с добавками  $NaF$  и  $Sc_2O_3$ , является вполне актуальной. Автором показано, что предлагаемый способ получения лигатур Al-Sc электролитическим восстановлением  $Sc_2O_3$  позволяют создать конкурентноспособную технологию производства лигатур. Основными достоинствами предлагаемой технологии являются непрерывность процесса производства и отсутствие отходов отработанных солей, поскольку электролит может длительно использоваться с небольшими корректировками состава. Также можно отметить возможность

организации предлагаемого способа непосредственно на электролизерах для получения алюминия.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы представлена следующими положениями:

- Установлены параметры и уточнен механизм электровосстановления алюминия из оксидно-фторидных расплавов  $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{KF-NaF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  при варьировании состава электролита и условий электролиза;

- Расширены фундаментальные представления о протекании физико-химических процессов в высокотемпературных расплавленных солях при получении алюминия и лигатур на его основе.

- Впервые установлены закономерности совместного электровосстановления алюминия и скандия из оксидно-фторидных расплавов  $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{KF-NaF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  с добавкой  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  в зависимости от состава расплава и условий электролиза;

- Установлены закономерности алюминотермического восстановления  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  в расплавах  $\text{KF-NaF-AlF}_3\text{-Sc}_2\text{O}_3$ .

- Выбран расплав  $\text{KF-NaF-AlF}_3$  с добавками  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и определены параметры синтеза лигатур Al-Sc с содержанием скандия от 1.5 до 2.5 мас.% при его электролизе.

### **Степень обоснованности научных выводов и практическая ценность работы**

Диссертационная работа А.Ю. Николаева в целом производит очень хорошее впечатление. Для выполнения задач и достижения цели использованы современные методы и подходы, уделено тщательное внимание чистоте электролитов и культуре проведения экспериментов. Поэтому полученные А.Ю. Николаевым результаты, их обсуждение и обоснованность сделанных в работе выводов сомнений не вызывает.

Более того, автором затронута крайне важная с практической точки зрения тема разработки эффективной ресурсосберегающей импортозамещающей технологии производства широко востребованной лигатуры Al-Sc, которая без всяких сомнений является перспективной, экономически обоснованной, и

заслуживает промышленной реализации. Это было успешно продемонстрировано на крупнолабораторном электролизере на силу тока 100 А, в результате чего было получено и аттестовано более 50 кг лигатуры Al-Sc с содержанием скандия до 2,5 мас.% и отвечающей требованиям ГОСТ по содержанию примесей. Разработаны рекомендации для опытно-промышленной реализации способа.

### **Вопросы и замечания по содержанию работы**

При ознакомлении с диссертационной работы А.Ю. Николаева возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе преимущественно описаны достоинства разработанного способа производства лигатур Al-Sc, однако мало внимания уделено его недостаткам и способам их дальнейшего устранения. Какие экспериментальные исследования необходимо провести для продвижения работы к практической реализации?
2. Согласно описанию, при получении алюминия электролизом исследуемых расплавов на вертикальном вольфрамовом катоде алюминий скапывает с катода на дно ячейки. Может ли являться растворение алюминия, не находящегося под катодным потенциалом, быть причиной понижения выхода алюминия по току?
3. Хроновольтамперограммы, полученные на стеклоуглероде, характеризуются сдвоенным катодным пиком (Рисунок 1.18). Нельзя ли это объяснить разрядом электроактивных ионов алюминия разного состава (например,  $AlF_4^-$  и  $Al_2OF_6^{2-}$ )?
4. Для разделения пиков, характеризующих разряд элементов с близкими электродными потенциалами часто используют квадратноволновую хроновольтамперометрию. Применяли ли вы этот метод исследования?
5. В работе не уделено внимание анодному процессу. Что выделяется на углеродном аноде при электролизе расплавов и могут ли быть использованы кислородвыделяющие аноды?

6. На рисунке 2.2 приведены хроновольтамперограммы, полученные при температуре 800°C на вольфраме в расплаве LiF-CaF<sub>2</sub> с разным содержанием ScF<sub>3</sub>. Исследовали ли вы растворимость фторида скандия в этом расплаве?

Отмеченные замечания не снижают общего хорошего впечатления о диссертационной работе, которая представляет собой законченное научное исследование, выполненное по актуальной тематике.

### **Публикации**

Основное содержание диссертации отражено в 29 печатных работах, в том числе в 11 статьях в журналах баз данных Scopus и Web of Science и журналах из Перечня ВАК, 18 публикациях в материалах отечественных и зарубежных конференций, а также 4 патентах РФ и 1 международной заявке на изобретение.

### **Предложения по расширенному использованию**

С результатами работы рекомендую ознакомить специалистов, работающих в области материаловедения, металлургии и электрометаллургии, в частности, в Институте металлургии и материаловедения РАН им. А.А. Байкова, Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, НИТУ «МИСиС», Институте легких металлов и сплавов, Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, а также на предприятиях и организациях металлургии, занимающиеся получением алюминия и его сплавами (ОК РУСАЛ, СУАЛ, Aleastur).

### **Заключение**

Диссертация А.Ю. Николаева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая выполнена и оформлена на высоком научном уровне, обладает внутренним единством, грамотно и логично изложенными результатами, квалифицированно и обоснованно сделанными выводами и рекомендациями, достоверность которых не вызывает сомнений; научные и

технологические результаты имеют фундаментальный характер и безусловную теоретическую и практическую ценность.

На основе совокупной оценки таких критериев, как актуальность выбранной темы, степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна, научная и практическая ценность изложенных материалов, можно утверждать, что представленная диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным в отношении диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук в Положении о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями от 20 марта 2021 г. № 426, а ее автор, Николаев Андрей Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности «2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии».

Официальный оппонент, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова

  
**Хасби Билялович Кушхов**

17.11.2021

360004, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173  
Тел. 89287196727  
[hasbikushchov@yahoo.com](mailto:hasbikushchov@yahoo.com)

Подпись Кушхова Х.Б. заверяю  
Ученый секретарь КБГУ



  
И.В. Ашинова