



## ОТЗЫВ

доктора технических наук, профессора Крюковского Василия Андреевича на диссертацию Горланова Евгения Сергеевича на тему: «Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Диссертационная работа Е.С. Горланова «Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана» посвящена разработке энергосберегающих способов синтеза диборида титана методами порошковой металлургии и электрохимии на поверхности и в объеме катодных изделий. Вместе с тем, определяются условия для эксплуатации смачиваемых твердых катодов в алюминиевых электролизерах. Тем самым создаются технологические основы разработки и проектирования алюминиевых электролизеров нового поколения повышенной производительности с минимальным воздействием на окружающую среду.

**Актуальность.** На основе анализа современного состояния и перспектив развития алюминиевой промышленности, степени изученности, материальной и конструктивной разработки технологии смачиваемых катодов для электролизеров с дренированными и вертикальными электродами автором определено, что исследования экономически целесообразных технологий получения диборида титана различными методами, готовность их к внедрению в производство недостаточны и требуют доработки. Это состояние проблемы затрудняет промышленную реализацию технических решений в данной области, ограничивает развитие экологически безопасных, инновационных технологий с применением электролизеров с дренированными катодами и вертикальными инертными электродами, что в конечном итоге определяет актуальность систематических исследований синтеза диборида титана для объемного и поверхностного легирования катодов алюминиевых электролизеров.

**Краткое содержание и результаты работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования.

Глава 1 посвящена рассмотрению проблем и направлений развития алюминиевой промышленности, общие и конкретные методы получения и применения керамических материалов, в том числе диборида титана для использования в конструкциях алюминиевых электролизеров.

Глава 2 посвящена разработке технологии низкотемпературного синтеза диборида титана. Изучен и установлен механизм синтеза с получением мелкокристаллических порошков в контролируемой атмосфере. На основе этих данных представлена технологическая модификация синтеза  $TiB_2$  в объеме углеродистых катодов под слоем расплавленных солей.

В 3 главе представлены результаты теоретической и практической разработки технологий электрохимического синтеза покрытий диборида титана на углеродном катоде. В лабораторных условиях методом последовательного электроосаждения исходных компонентов и методом борирования композитных катодов получены смачиваемые алюминием покрытия, которые рентгенофазовым анализом и электронной микроскопией

N 120-9  
07.11.06.2020г.



идентифицированы как индивидуальный диборид титана  $TiB_2$  и соединения сложного состава в системе Ti-B-C.

В главе 4 представлены материалы промышленных испытаний и внедрения технологии борирования примесей тяжелых металлов в составе жидкого алюминия непосредственно в электролизерах с обожженными анодами. Подтверждена техническая эффективность технологии очистки алюминия от примесей, возможность вовлечения в производство нефтяных коксов с высоким содержанием тугоплавких металлов.

В главе 5 исследована экономическая эффективность разработанных технологий низкотемпературного синтеза диборида титана в виде порошков и электрохимических катодных покрытий применительно к действующей технологии электролиза алюминия и к электролизерам нового поколения с дренированными катодами. По критериям срока окупаемости и прибыли за срок службы электролизеров установлены оптимальные и наилучшие варианты использования разработанных технологий.

**К основным результатам** исследования Е.С. Горланова, свидетельствующим о его научной новизне можно отнести:

- Разработана и реализована технология низкотемпературного карботермического синтеза диборида титана в системе  $TiO_2-B_2O_3-C$  при температурах  $1030-1050^\circ C$ .
- В условиях электрохимического осаждения компонентов солевого расплава на углеродном катоде установлена причинно-следственная связь между физической неоднородностью поверхности электродов, нестабильностью процесса электролиза, качеством катодных покрытий и формированием электролитной прослойки на межфазной границе Al-катод.
- В криолитоглиноземных расплавах при  $965-970^\circ C$  и плотности тока  $0,7-0,8 A/cm^2$  методом электрохимического борирования углеродтитановых катодов впервые синтезировано смачиваемое алюминием  $100-500 \mu m$  покрытие диборида титана.
- Испытана и внедрена технология борирования избыточных примесей ванадия в жидком алюминии на промышленных алюминиевых электролизерах ОА 320 кА Казахстанского электролизного завода с формированием на поверхности катода смачиваемого алюминием защитного слоя боридов тугоплавких металлов.

**Теоретическая и практическая значимость исследования:**

- Установлен механизм карботермического синтеза диборида титана, включающий восстановление модифицированного фтором оксида титана до его оксикарида с последующим восстановлением оксидом бора до  $TiB_2$
- Установленная экспериментально и подтвержденная экономическими расчетами себестоимость 40-50 долларов за 1 кг полученного диборида титана дает основание планировать рентабельное промышленное производство индивидуальных соединений и композитов на основе диборида титана для электродов и футеровки металлургических агрегатов.
- Термодинамическими расчетами уточнены стандартные потенциалы разряда ионов бора и титана на углеродном катоде и экспериментально установлены уровни напряжения электролиза криолитоглиноземных расплавов, при которых достигаются потенциалы разложения оксидов бора, титана и сложных оксидных соединений при различных плотностях тока.
- Установлен механизм формирования смачиваемого алюминием  $TiB_2$  слоя методом борирования углеродтитановых катодов, включающий стадии электрохимического



восстановления бора на катодной поверхности и последующего его взаимодействия с легирующими компонентами в зонах переноса и контакта.

- Технология поверхностного легирования композитных катодов методом борирования открывает перспективы ее применения для действующего производства и электролизеров нового поколения с дренированными катодами и вертикальными электродами.
- Промышленные испытания технологии борирования избыточных примесей тугоплавких металлов в алюминии позволили внедрить технологию очистки алюминия и создания смачиваемого слоя на катодах электролизеров ОА 320 кА Казахстанского электролизного завода. Технология борирования алюминия подтверждена актом внедрения.

**Достоверность результатов исследования.** Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждена необходимым объемом экспериментальных лабораторных и промышленных испытаний, комплексом современных физико-химических методов исследований, воспроизводимостью экспериментов, обсуждением основных положений работы на российских и международных научных конференциях и их публикацией в соответствующих журналах, применением в промышленности.

Основные научные результаты, полученные автором диссертации, достаточно полно отражены в 32 публикациях, в том числе в 1 монографии, 15 публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, прочих 4 изданиях, результаты работы доложены на 12 Международных и Российских конференциях. По теме диссертации получено 9 патентов.

Положительно в целом оценивая диссертационное исследование, проведенное Е.С. Горлановым, считаю необходимым высказать **несколько вопросов и замечаний:**

- Отсутствуют вольтамперные исследования, которые позволяют определить условия электролиза, стадийность и кинетические параметры изучаемых электрохимических процессов синтеза диборида титана;
- Недостаточно глубоко проанализированы причины промышленного не использования технологии дренированных катодов, испытания которых в Comalco, Kaiser и др. заканчивались с положительными результатами.
- В расчете экономической эффективности необходимо обоснование величины ожидаемого снижения МПР для различных технологий.

Высказанные замечания оставляют в целом позитивным отношение к новизне, теоретической и практической значимости проведенного исследования.

## **Заключение**

Работа Е.С. Горланова представляет собой завершенное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на достаточно высоком уровне. Диссертация «Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов, соответствует требованиям пунктов 2.1-2.6 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 26.06.2019 № 839адм, а ее автор – Горланов Евгений Сергеевич – заслуживает присуждения



ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Доктор технических наук, профессор,  
Советник

Тел.: +7-915-380-24-62

E-mail: [Vasily.Kryukovskiy@rusal.com](mailto:Vasily.Kryukovskiy@rusal.com)

Дата: 26 мая 2020г



Крюковский  
Василий  
Андреевич

Подпись **Крюковского Василия Андреевича**

**Заверяю:**

Должность, звание

Дата: 26.06.2020 г.



*Григорьев, А.Р.*

Адрес организации

г. Москва, РФ, 121096,

Ул. Василисы Кожиной, д.1,

этаж 2, помещение 24

Тел.: +7 (495) 720-51-70.

Полное наименование организации

Акционерное общество «РУССКИЙ АЛЮМИНИЙ Менеджмент»