

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

_____ Н.В. Белоусова

«_____» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Повышение энергетической эффективности высокоамперных
электролизёров за счет контакта «анододержатель – угольный анод»

Руководитель

Подпись дата

д-р хим. наук, профессор
Н.В. Белоусова

Консультант по
экономической
части

Подпись дата

канд. экон. наук, доцент
Т.В. Твердохлебова

Магистрант

Подпись дата

Р.В. Биль

Рецензент

Подпись дата

Директор департамента
технологии и
технологического
развития алюминиевого
производства САЗ
А.Н. Анисиферов

Красноярск 2020 год

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Повышение энергетической эффективности высокоамперных электролизёров за счет контакта анододержатель – угольный анод» содержит 73 страниц машинописного текста, 44 рисунков, 6 таблиц, список источников из 50 позиций.

Цель работы – подтверждение возможности снижения потерь электроэнергии за счет внедрения малозатратных предложений по соединению анододержателя с угольным анодом в ниппельной заливке.

В ходе исследований были предложены и обоснованы следующие решения:

1. Графит является общеизвестным и эффективным контактным материалом. При существующей технологии монтажа применяется графитовая суспензия, которая наносится на поверхность ниппеля. Предлагается испытать нанесение аналогичного материала на поверхность ниппельного гнезда, для снижения контактного сопротивления. Дополнительные операционные затраты составят 0,09 USD/т алюминия – решение окупается при снижении напряжения на 1,1 мВ (при цене на электроэнергию 0,025 USD/кВт·ч).

2. Нижняя поверхность ниппеля практически не передаёт ток из-за низкого контактного давления и наличия воздушного зазора образующегося при монтаже анода. Установка стальных пластин с высоким коэффициентом термического линейного расширения (КТЛР), обеспечивающих прижатие к нижней поверхности ниппеля/гнезда и снижение контактной плотности тока на 25-30%.

3. Использование медного купороса позволяет снизить контактное электрическое сопротивление токопроводящей цепи алюминиевого электролизера.

Ключевые слова: АНОДОДЕРЖАТЕЛЬ, НИППЕЛЬНАЯ ЗАЛИВКА, ГРАФИТ, МЕДНЫЙ КУПОРОС, АЛЮМИНИЕВЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение.....	5
Цель и задачи исследования.....	7
1. Современное состояние вопроса в области разработки анодных устройств алюминиевых электролизеров	7
1.1 Этапы разработок высокоамперных технологий.....	8
1.2 Характеристика анодного устройства	13
1.3 Конструкция анодных токоподводов	24
1.4 Особенности моделей.....	26
1.5 Создание альтернативной трехмерной модели стального паука в анодном узле.....	40
1.6 Медная вставка в стальном пауке.....	44
Выводы по разделу 1.....	47
2 Анализ текущей ситуации и постановка задач.....	48
2.1 Монтаж опытных анодов	50
2.2 Выполнение замеров опытных анодов	53
2.3 Результаты по замерам контакта «ниппель – анод».....	54
2.4 Опытные аноды после жизненного цикла.....	60
3 Экономическая часть	63
Вывод по разделу 2.....	65
Заключение по работе... ..	66
Список литературных источников.....	67

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КТЛР – Коэффициент термического линейного расширения

ОПКЭ – Опытный промышленный корпус электролиза

ОА – Обожженные аноды

ИТЦ – Инженерно-технический центр

ТЭМ – Теплоэлектрический механический

СОА – Само обжигающие аноды

МПР – Межполюсное расстояние

КТР – Коэффициент теплового расширения

МДО – Микро дуговое окисление

КЭМ – Конечно-элементная модель

НТД – Нормативно-технические документы

УТЗ – Участок технических замеров

ЖУ – Жизненный цикл

ЧО и ДЭ – Чистка огарков и дробление электролита

АМО – Анодное монтажное отделение

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии электролиза с предварительно обожженными анодами в настоящее время рассматривается с точки зрения снижения энергоемкости процесса, снижения капитальных затрат на строительство новых заводов, оптимизации операционных затрат на ведение технологического процесса и улучшения экологических показателей. Прежде всего, это связано с непрерывным поиском улучшений не только в конструктивных элементах электролизера, но и в методах управления технологическим процессом, выполнения операций и логистике.

Применение электролизеров высокой мощности является основным мировым трендом повышения эффективности производства первичного алюминия за счет снижения капитальных затрат на строительство увеличения энергетической эффективности и производительности труда.

По состоянию на сегодняшний день пять компаний, помимо Объединенной Компании РУСАЛ, обладают технологиями на силу тока свыше 400 кА, и в настоящее время в мире реализован ряд проектов по разработке технологий на силу тока свыше 500 кА. В Китае на сегодняшний день применение технологий на силу тока 500 кА и выше реализовано в промышленном масштабе.

В настоящее время Компания РУСАЛ имеет собственные современные технологии электролиза с обожженными анодами RA-300 и RA-400. Технология RA-300 реализована в промышленном масштабе в рамках Хакасского Алюминиевого Завода и применяется при строительстве Богучанского Алюминиевого Завода, технология RA-400 применяется при строительстве Тайшетского Алюминиевого Завода. Кроме того, Компания завершила исследовательские проекты по созданию технологий электролиза с высокой плотностью тока и использованием нерасходуемых анодов. Испытания методов ведения технологии, технологических режимов и проверка конструкции электролизеров RA-300 и RA-400 ведется на опытных

участках Саяногорского Алюминиевого Завода. Пять опытных электролизеров РА-300 установлены в корпусе электролиза №8 (ванны №887-891) и введены в опытно-промышленную эксплуатацию, начиная с декабря 2003 года. Шестнадцать опытных электролизера РА-400 установлены в ОПКЭ и введены в опытно-промышленную эксплуатацию, начиная с декабря 2005года.

Проведенные на опытном участке Красноярского Алюминиевого Завода испытания технологии и технических решений на высокой плотности тока и технические решения, использованные при проектировании электролизеров РА-300, РА-400 и ОА-120М, свидетельствуют о возможности создания электролизера на силу тока свыше 500 кА. При этом основной конкурентный недостаток компании РУСАЛ по сравнению с передовыми западными аналогами – большой расход электроэнергии, который может быть значительно снижен.

В современных электролизерах для производства алюминия с предварительно обожжёнными анодами (ОА) электрический контакт между токоподводом (ниппеля анододержателя) и угольным анодом обеспечивается за счет заливки чугуна в гнездо (углубление) в анодном блоке, в которое вставлен ниппель (стальной стержень). Соединение характеризуется высоким уровнем потерь электроэнергии (200-300 кВт×ч/т) и снижает эффективность.

Лучшие известные варианты конструкции данного узла обеспечивают снижение энергетических потерь до уровня 150-160 кВт×ч/т, но характеризуются дополнительными затратами на получение ниппельного гнезда необходимой конфигурации и защищены патентами компаний-конкурентов.

Новый вариант контакта между токоподводами угольным анодом должен обеспечивать возможность плавного перехода в условиях действующего производства (анодное производство, электролизное производство); общий уровень затрат на реализацию должен составлять не более 25\$/ тонну алюминия.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – разработка нового варианта соединения анододержателя с угольным анодом, позволяющего повысить энергоэффективность высокоамперных электролизёров за счет снижения перепада напряжения в системе ниппель-анод.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить выбор токопроводящих материалов и обосновать их использования в качестве контактные соединения.
2. Провести испытания на опытном участке.
3. Провести испытания с установкой стальных пластин с высоким КТЛР.
4. Выполнить экономический расчет для подтверждения эффективности и целесообразности, предлагаемых решения.

В результате внедрения предлагаемых решений должно произойти снижение потерь электроэнергии при производстве алюминия на электролизерах ОА и, как следствие, снижение себестоимости производства на ~5 \$/тонну алюминия.

Результаты исследования и технические решения могут быть использованы при проектировании новых заводов и модернизации существующих производственных мощностей компании РУСАЛ, оснащённых электролизёрами с обожжёнными анодами, а также для возможной продажи технологии или патента третьей стороне.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ АНОДНЫХ УСТРОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

1.1 Этапы разработок высокоамперных технологий

Более ста лет алюминиевая промышленность [1] применяют электрохимический процесс Поля Эру и Чарльза Мартина Холла для производства алюминия электролизом криолитоглиноземных расплавов с использованием углеродного анода. Все это время технологию производства непрерывно совершенствовали, при этом основным направлением в развитии было увеличение единичной мощности электролизеров. С начала 20-го века до наших дней сила тока промышленных электролизеров увеличилась с 20-40 до 400-500 кА.

Для развития российской алюминиевой промышленности в соответствии с мировыми тенденциями необходима [2] новая концепция энергоэффективного производства алюминия в криолит-глиноземных расплавах в электролизерах с силой тока 600 кА. В данной статье выявлена и обусловлена вероятность внедрения новой высокоамперной технологии получения алюминия. Еще приведены основные отличительные особенности высокоамперных технологий по сопоставлению с электролизерами средней мощности.

Современный метод производства алюминия [3] (процесс Эру-Холла) не претерпел фундаментальных изменений за более чем 100 лет своего существования. Он характеризуется невысокой удельной производительностью (около 1 кг/м²·ч), большой энергоемкостью и содержит неудовлетворительные экологические характеристики. В 70-80-х годах прошлого века было проведено большое количество исследований, нацеленных на улучшение существующей технологии и создание других способов получения алюминия. Карботермический метод и неклассические процессы электролиза (низкотемпературный электролиз хлоридов и фторидных расплавов с «инертными» вертикальными электродами (низкое потребление)) достигли своего максимального развития. Из-за недостаточного освещения в национальной литературе основных тенденций

развития новых и усовершенствования существующих методов производства алюминия в статье был проведен соответствующий обзор.

Исследование [4] инертных анодов сочетается с одним из основных направлений модернизации инновационной алюминиевой промышленности [5]. По всему миру проводятся многочисленные исследования материалов, которые могут выступать в качестве инертных анодов. Масштабными исследованиями изучено большое количество керамических материалов, металлокерамики и металлов [6-7]. Наиболее перспективны с финансовой и технологической точки зрения металлические сплавы за счет простоты их изготовления, высокой механической прочности и низкого электрического сопротивления. Основным недостатком металлических анодов является плавление криолит-глинозема в условиях анодной поляризации.

Производство алюминия [8] с использованием керамического анода. Использование керамического анода применяется в сфере цветной металлургии, а также используется при производстве металлов электролизом расплавленных электролитов с инертными анодами и для производства электролитического производства из сплавов фтора, с содержанием оксида алюминия, в электролизере с применением анодов на основе электропроводящего оксидного материала. Диоксид олова со структурой рутила. В электролизном производстве с применением анодосодержащих добавок, которые могут варьироваться, а также могут образовывать твердые растворы замещения с трехвалентными катионами и пентавалентными катионами в структуре рутила, при условии, что общее количество добавляемых соединений не превышает 30 мас.% и температура при проведении электролизного процесса не превышает 950 °С. Для введения трехвалентных катионов в анод применяют модифицирующие добавки с содержанием соединений Fe, Al, Mn, Cr, In, а для введения пентавалентных катионов, Sb, Nb и Ta. В состав анода также входит металлический компонент, который во время синтеза не взаимодействует с оксидным

материалом и рабочей температуры в количестве, не превышающем 40 мас.%. В качестве металлических компонентов используют драгоценные металлы такие как Cu, Ni, Ag, Au, Pt, Pd и их сплавы. Это приводит к снижению скорости анодной коррозии и загрязнения получаемого металла.

В статье [9] систематически рассматриваются вопросы, связанные с технологией производства алюминия в сверхпрочных алюминиевых электролизерах с прокаленными анодами, изучаются процессы растворения глинозема в кислотных электролитах в меняющихся магнитодинамических условиях и разрабатываются методические основы диагностики процесса. Мощных алюминиевых электролизеров. Подробно рассмотрен вопрос об увеличении срока службы и проблемах эксплуатации отечественных электролизеров с силой тока более 300 кА.

Структура алюминиевого электролизера любого типа [10] состоит из катодной и анодной группы различных типов и мощностей, сердечника, коллектора дымовых газов и опор для металлических конструкций. С началом алюминиевой промышленности размеры, потребление энергии и производительность электролитических электролизеров изменились, но основные компоненты, перечисленные выше, применяются к электролитическим электролизерам различной конструкции и прочности.

Современно технологические электролизеры могут различаться по конструкции катодного [11] кожуха, контрфорсный или шпангоутный, по анодному устройству.

Основной движущей силой развития новых технологий является стремление снизить себестоимость производства алюминия. Все крупнейшие алюминиевые компании мира работают над тем, чтобы эксплуатировать электролизеры, работающие с большой силой тока, поскольку использование мощных электролизеров может повысить экономическую эффективность новых заводов за счет снижения удельных капитальных и эксплуатационных затрат.

В качестве примера на рис. 1 показаны основные этапы разработки электролизеров высокой мощности PCHINEY, технология которых является отраслевым стандартом.

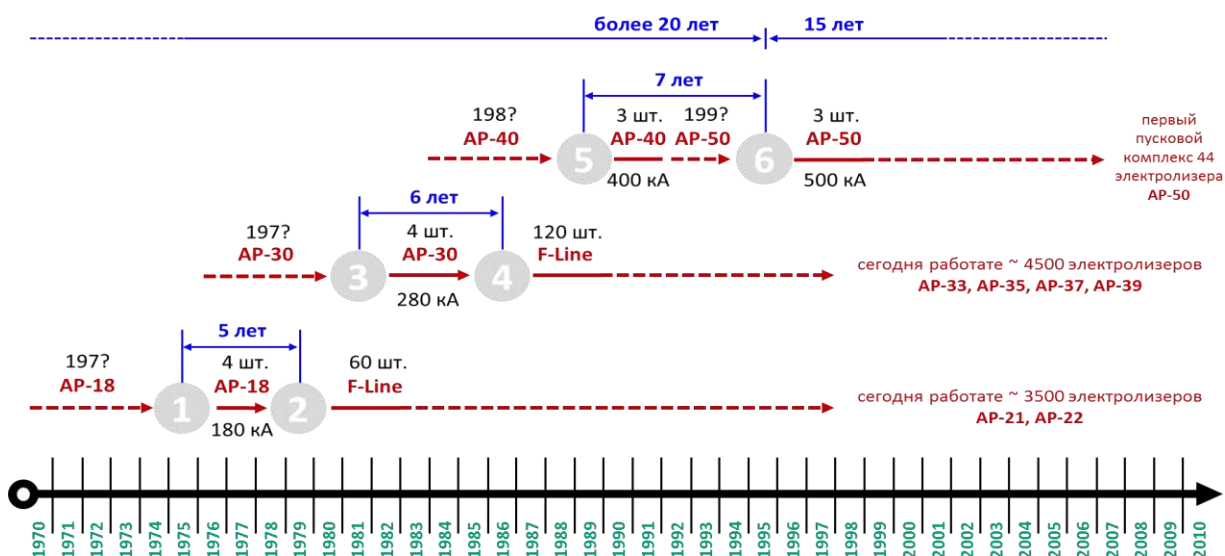


Рисунок 1 – Этапы разработки высокоамперных технологий компанией PCHINEY

На рисунке 1 показано, что полный цикл разработки технологии (проектирование, тестирование прототипа и внедрение в промышленном масштабе) занимает приблизительно 10 лет. В то же время цикл разработки варьируется в зависимости от успеха проекта и условий рынка. Например, технология AP 50 была протестирована на уровне прототипа около 15 лет без промышленного внедрения.

РУСАЛ – сравнительно молодая компания, основанная в 2000 году. С момента основания руководством компании было выбрано направление интенсивного развития и поставлены амбициозные цели:

- занимать лидирующее положение в мире по производству алюминия;
- интенсивно развивать производство алюминия путем строительства новых заводов;
- модернизировать существующие технологии и создавать новые;
- повышать конкурентоспособность на мировом рынке.

Для достижения намеченных целей необходимо иметь собственную технологическую базу, отвечающую мировым стандартам.

На промплощадке АО Русал - Саяногорск за последние несколько лет была отработана и запущена технология РА-300, разработана технология РА-400 для Тайшетского алюминиевого завода, кроме этого, на промплощадке установлены 6 различных марок электролизеров, работающих по технологии обожженного анода.

Разработка технологии РА-300 и РА-400 продвигалась интенсивными темпами (сроки разработки являются беспрецедентными для отрасли), особенно учитывая тот факт, что они во многих отношениях представляли значительный отход от более ранних проектов института ВАМИ, на которых основаны серии электролиза САЗа, эксплуатирующие мощные электролизеры. Технологии РА-300 и РА-400 были разработаны на основе сравнительного анализа лучших западных результатов, широкого инженерно-конструкторского потенциала Инженерно-технологического центра (ИТЦ) и опыта, накопленного в области быстрого использования. Экспериментальных образцов электролизеров. На рис. 2 представлены основные этапы реализации этих проектов.



Рисунок 2 - Этапы разработки высокоамперных технологий компанией РУСАЛ

Применение собственных наработок в области моделирования, проектирования и строительства позволили компании РУСАЛ в короткий срок (~ 8 лет) стать обладательницей собственных высокоамперных технологий электролиза с обожженными анодами на силу тока 320 и 425 кА.

1.2 Характеристика анодного устройства

Алюминиевый электролизер [12] имеет углеродный блок, силовой стержень, жестко закрепленный в углублениях верхней поверхности углеродного блока, и анодную подвеску, закрепленную в верхних торцах попарно с обеих сторон стержня на перекладине, а также пакет алюминиевых листов и стекловолоконных пучков, которые подвешены и прикреплены к алюминиевому стержню. И стержень, снизу пачка алюминиевых листов и стекловолоконных прицепов проходит через прямоугольные отверстия в выступе угольных анодов, длина, поперечное сечение пакета и жгутов, а также их количество зависят от технологических и экономических требований. Это обеспечивает снижение материальных и трудовых затрат при производстве алюминия и снижение энергозатрат.

В монографии [13] рассмотрены научные основы комплексного теоретико-экспериментального исследования теплоэлектрического и механического (ТЭМ) состояния высокотемпературных агрегатов энергоемких производств. Развита теоретическая основа методов граничных и конечных элементов для решения краевых задач теории теплопроводности и термоупругопластичности с учетом сложного теплообмена, фазовых переходов и контактного взаимодействия, методики сложения теоретических энергобалансов алюминиевых электролизеров и печей графитирования различной мощности. Разработаны численные модели для расчета ТЭМ состояния высокотемпературного оборудования, ориентированные на решение проблем проектирования при создании новой техники и прогрессивных технологий.

Применение пиролиза в жидком металле для модифицирования угольных анодов [14]. Эта статья посвящена экспериментальному исследованию процессов импрегнации исходных и пиролиза импрегнированных образцов обожженных анодов, проводимых для повышения их коррозионной стойкости. Промышленное производство первичного алюминия осуществляется электролизом металлургического глинозема (оксид алюминия Al_2O_3) в расплавленном криолите ($3NaF \cdot AlF_3$). Этот процесс осуществляется в электролизерах с углеродными катодом и анодом. Существующие проблемы в алюминиевой промышленности, в той или иной степени, связаны с работой анодов в электролизерах. По разным источникам, затраты на обожженные аноды в себестоимости алюминия составляют от 15 до 17 %, достигая 25 %. Одним из путей решения этой проблемы является улучшение технико-экономических показателей свойств анода, что требует применения инновационных технологий для его производства.

В настоящей работе предлагается принципиально новый технологический подход к созданию обожженных анодов нового поколения. С целью повышения коррозионной стойкости обожженных анодов предлагается проводить процесс модифицирования готовых образцов обожженных анодов методом импрегнирования органических соединений (на основе битума) и последующего их высокотемпературного пиролиза в расплаве металла (синец – висмут). Повышение коррозионной стойкости анода обуславливается протеканием физико-химических процессов, результатом которых является уменьшение общей, открытой и закрытой пористости, повышение кажущейся и истинной плотности, повышение плотности контактов между компонентами системы за счет адгезионных и химических сил взаимодействия, залечивание дефектов структуры анодной матрицы; предотвращение распространения микротрещин в аноде.

Электролизный анод предназначен для подачи тока в междуполюсное пространство [15] для процесса электролиза. Анодное устройство включает в себя: угольный анод; подъемный механизм для перемещения анода во время его сгорания или при заливке металла из ванны; сборные шины; несущая конструкция, которая может быть установлена в корпусе катода или в специальных стойках на основе фундамента.

В данной работе [16] рассмотрена задача расчета алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхней подачей тока. Средой разработки был выбран AppDesigner, из-за его простого синтаксиса и удобства построения пользовательского интерфейса. С помощью [17] данного программного продукта реализовано приложение для расчета всех ключевых параметров электролизера, распределены все данные по вкладкам для удобства дальнейшего исследования, реализована возможность построения зависимости и т.д.

Анодная структура, выполненная из обожженных анодов электролизера, состоит из двух отдельных блоков, состоящих из двух рядов, общее количество которых зависит от тока. Данные аноды являются наиболее проводящими ток, так как являются само обжигающимися анодами (СОА) и не выделяют вредных соединений во время работы, потому что анод производится без сжигания в специальной печи.

Углеродное анодное подъемное устройство состоит из двух рядов анодных блоков длиной 700 и 1450 мм в современных электролитических производствах. Высота блока обычно не превышает 600 мм. Численность углеродных блоков, так же, как и рядов зависит от силы тока. В процессе изготовления цилиндрические гильзы изготавливаются в анодном блоке, вставляются в токопроводящие стальные ниппели и отливаются из чугуна, который сверху соединен стальной балкой. Последний связан алюминиевым стержнем, который привинчен к анодной шине. Алюминиевый стержень, таким образом, также служит в качестве опорной конструкции. Способы

крепления стержня к балке различны: сварные, сборные, винтовые, клиновидные и т.Д.

Анодный узел представляет собой анодный массив, состоящий из двух параллельных рядов обожженных анодов. Анодный массив состоит из анодов, в котором имеется гнёзда для ниппелей (рисунок 3).

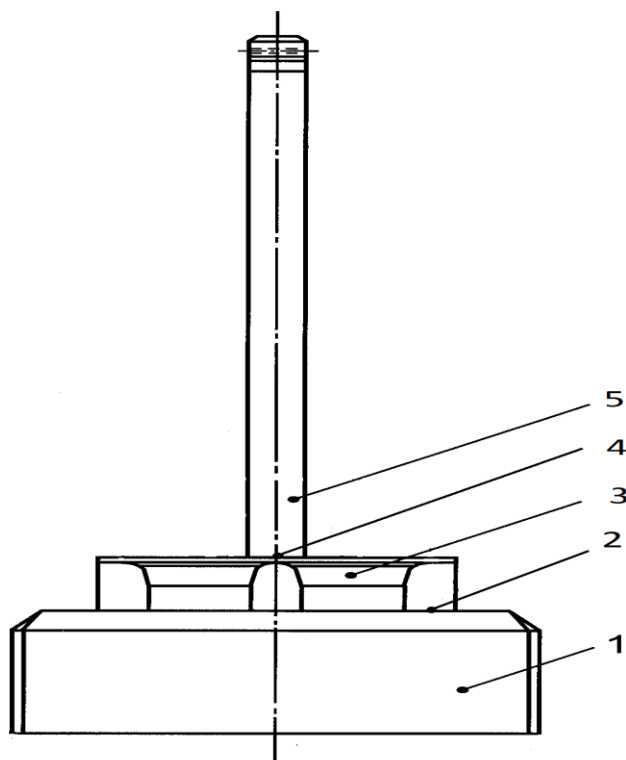


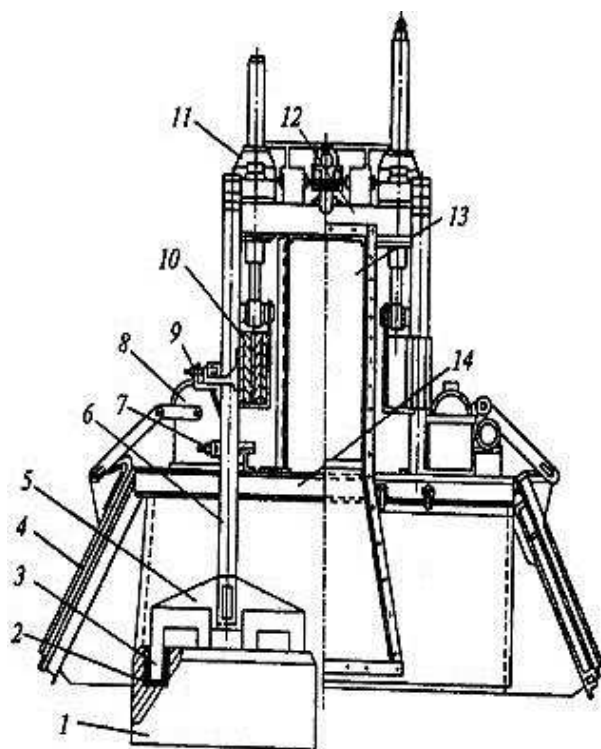
Рисунок 3 – Анодное устройство: 1-анодный блок; 2- ниппель; 3-кронштейн; 4-сварочное соединение; 5-штанга;

Кронштейн с анодным блоком соединен с помощью специального чугунного литья. С другой стороны, он приварен к алюминиевой полосе. Контакт между стержнем и алюминиевым стержнем осуществляется с помощью зажимного устройства. Шины крепятся к гнездам подъемного механизма, закрепленным на анодном коллекторе пучка. Ригели приварены в нижней части коллекторной балки, на которую упираются откидные щитки электролизера, выполненные из алюминиевого листа. По мере сгорания подошвы анодного массива, анодная рама опускается, тем самым поддерживается необходимое междуполюсное расстояние. Рама,

опустившаяся до нижнего значения 50мм, должна быть перетянута. Сгоревшие аноды, огарки, меняются на новые аноды в соответствии с циклом замены анодов.

Число гнезд в анодном блоке зависит от длины уплотнения и обычно составляет от 2 до 4 штук. Глубина гнезда в блоке очень важна, потому что напряжение на этом контакте определяет высоту нагруженной части анода, т.е. относится к расходу анода. Глубина больше, ток дороже, но обычно на 100 миллиметров.

На рис. 4 рама является наиболее важным элементом анодного устройства, которое несет всю массу анода, которая в современных ваннах достигает почти 100 тонн. Во всех типах электролизеров, рама с подъемными механизмами установлена на несущей конструкции, которая, в свою очередь, опирается на корпус катода, а в двухэтажных зданиях, они также могут быть установлены на специальных стойках, установленных на их основе.



1 – анодный блок; 2 – заливка
ниппеля; 3 – ниппель; 4 – крышка
укрытия; 5 – траверса; 6 – штанга; 7 –
временный зажим; 8 – механизм подъема
укрытия; 9 – основной зажим; 10 –
анодная шина; 11 – механизм подъема
анодного массива; 12 – анодная рама; 13
– короб газоотсоса; 14 – поперечные
балки.

Рисунок 4 - Анодное устройство электролизёра с ОА

Изобретение [18] анодного устройства относится к обожженным анодам и может быть применено с целью оптимизации ширины корпуса электролиза при поперечном расположении электролизеров. Анодное устройство содержит балку-коллектор с вертикальными опорными стойками, опирающимися на фланцевый лист катодного кожуха, укрытие электролизера со съемными и распашными створками, размещенными по продольным и торцевым сторонам электролизера. Балка-коллектор анодного устройства имеет П-образный проем, выполненный по всей высоте балки-коллектора с лицевой торцевой стороны электролизера, при этом ширина и длина П-образного проема выполнена с возможностью перемещения вакуумковша для забора металла вертикально. Обеспечивается возможность уменьшения ширины корпуса электролиза с поперечным расположением электролизеров, сокращение времени технологической операции по проведению забора металла из электролизной ванны.

Представлены результаты практических исследований [19] по контролю технологических параметров электролизеров различных проектов и электрохимических систем. На основе данных по электролизерам для производства алюминия был разработан и внедрен метод мониторинга водородного электролизера, который позволил снизить потребление энергии при производстве водорода с 5,6 до 5,3 кВт / ч и сэкономить 800 000 гривен на электролизер в год.

Предметом исследования [20] является современный алюминиевый электролизер с обожженными анодами (ОА) мощностью 175 кА Таджикского алюминиевого завода. С увеличением текущей нагрузки изменяются физические условия движения компонентов расплава, что связано с увеличением скорости слоев металла и электролита в электролизной ванне. Изменение гидродинамического состояния криолит-глиноземного расплава зависит от корректировки содержания основных

компонентов расплава в соответствии с отношением криолита (КО) и гарантией максимальной производительности процесса.

Электролизер [21] по меньшей мере имеет один собирающий стержень, выполненный из первого металла, и дополнительная полоса, выполненная из второго металла, имеют более высокую проницаемость, чем первый металл, и расположены близко к одной из сторон. Поверхности линии сборки должны находиться на постоянном расстоянии от указанного края блока до внешнего конца дополнительной полосы. Другой конец ограничивает потери тепла выбранной электролитической ванны. Можно получить более низкое напряжение по сравнению с известными электролизерами и исключить чрезмерную потерю тепла от коллекторных стержней.

Факторы, влияющие на разрушение металлических анодов [22] при агрессивной среде и высоких температурных явлениях электролиза, были приняты во внимание. Фактически модель объективно моделирует процессы разложения никелевых сплавов при электролизе алюминия и позволяет прогнозировать и регулировать их.

Определение анодного перенапряжения [23] в алюминиевых электролизерах является важной технической задачей, т. к. на разных анодах эта величина может варьироваться в пределах 300-650 мВ, и управление этой величиной может привести к снижению удельного расхода электроэнергии на 500-1000 кВт·ч/т Al. Результаты, получаемые при лабораторных исследованиях, необходимы для понимания природы электродных реакций, но не всегда отражают реальную картину, имеющую место в электролизере в виду того, что размеры (и, как следствие, гидродинамические условия) лабораторных ячеек и промышленных аппаратов не сопоставимы. Для измерения анодного перенапряжения на действующих алюминиевых электролизерах разработан и испытан промышленный сканирующий электрод сравнения.

На электролизерах с ОА анодная шина также установлена на раме, не считая анода, и поэтому она движется вместе с рамой. В некоторых конструкциях анодная шина также служит анодной рамой.

Рама анода на электролизерах с ОА сужается с помощью переносных порталов, которые несут неподвижная газосборная конструкция, или с помощью временных зажимов, которые прикреплены к токонесущим стержням над газосборные конструкции. После подвешивания анодов с временными зажимами или порталом ослабьте зажимы, прижимая рабочий стержень к сборной шине анода и включают привод, который поднимает раму анода. Однако анодное расположение остается на временных клеммах. После подъема рамы в верхнее положение зажимы фиксируются, и только после этого удаляется временная анодная подвеска.

Следует отметить, что увеличение степени перетяжки рамы при любой существующей конструкции источника питания приводит к увеличению потерь электроэнергии в токоведущих элементах, но снижает эксплуатационные расходы на эту операцию. Поэтому выбор этапа перетягивания может быть определен путем минимизации затрат.

Также расходуются аноды и другие конструкции держателя анода [24], включая аноды, соединенные с держателем анода в форме паука. Некоторые модели используют два ряда расположение ниппелей. Выбор зависит от конкретной конструкции электролитической ванны.

Нельзя сваривать железные и алюминиевые стержни напрямую. В соединении используется железо - алюминиевая вставка, которая состоит из двух металлических пластин: стали и алюминия, сваренных взрывной сваркой. Барьерный слой из титановой фольги, расположенный между пластинами, предотвращает химическую реакцию железа и алюминия и предотвращает образование разрушенного слоя интерметаллидов FeAlm. Соединения металлов приводят к значительному увеличению электрического сопротивления и снижению механического сопротивления контакту.

Стальная пластина соединения изготовлена из стали и приварена к стальной опоре, а алюминиевая пластина сконструирована так, как будто она приварена к алюминиевому стержню. Следовательно, качественный контакт может быть получен от различных конструктивных элементов анододержателя. Гнезда держателя анода соединяются чугуном с углеродным анодом. Структура чугуна имеет очень высокие требования: содержание углерода и кремния должно составлять от 3,0 до 3,7 и от 2,0 до 3,6% соответственно.

Дабы защитить аноды от окисления и уменьшить потери тепла, массив анода покрыта специальным материалом покрытия, который заключается из смеси оксида алюминия и обратного электролита.

Электролизеры [24] в первую очередь предназначены для использования стандартных анодов с тремя ниппелями. Электролизеры перед пуском оснащаются полным комплектом анодов.

Электрические характеристики анодного узла, включая кронштейн, угольный анод и чугун, могут быть выражены падением напряжения в каждой из этих участков как представленные в таблице 1

Таблица 1 Падение напряжения в анодном узле

Измеряемый участок	dU , мВ
Контакт шина – штанга	10
Штанга	40
Штанга – кронштейн	25
Кронштейн и ниппель	20
Ниппель – анод	90
В теле анода	130
Всего	315

Эти данные отражают лучшие в мире результаты с точки зрения конструкции кронштейна и качества анода.

Изобретение относится к способу [25] подготовки обожженных анодов для электролиза алюминия. Способ включает, нагрев анода перед помещением его в расплав электролита. Нагрев выполняют в герметичном объеме посредством тока высокой частоты 20-120 МГц до температуры поверхности анода 350-800°C. Обеспечивается ускорение нагрева поверхностного слоя анода с исключением тепло потерь.

На рисунке 5 показано изменение силы тока на вновь установленном аноде с момента его установки и после 10 дней эксплуатации. МПР было взято от 2 до 6 см. График показывает, что аноды, установленные с низким МПР, через 5-6 часов выдерживают номинальную нагрузку 7 кА, которая затем увеличивается до 10-13 кА.

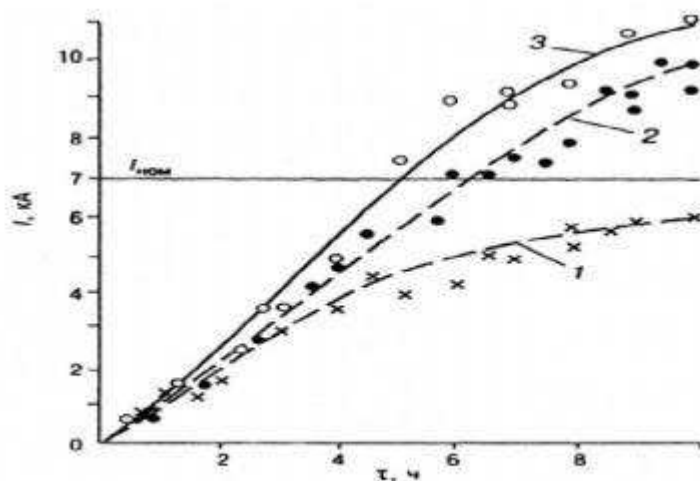


Рисунок 5 – Зависимость силы тока на вновь установленном аноде.

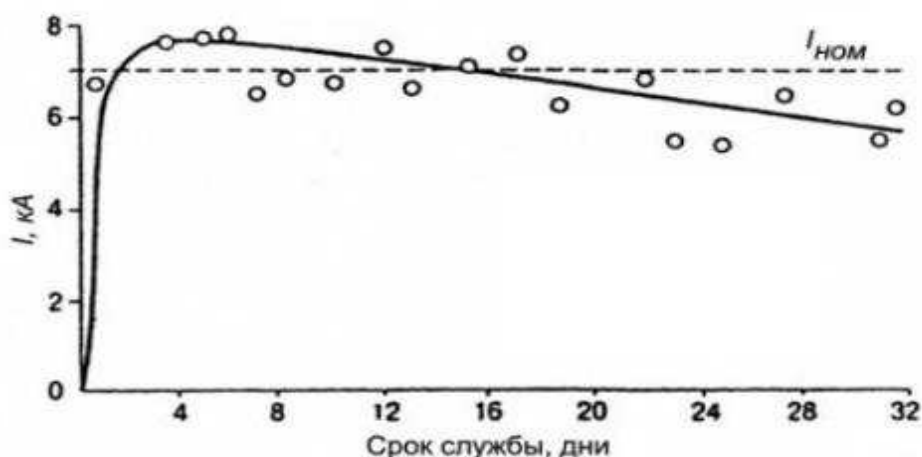


Рисунок 6 – Зависимость силы тока на аноде от среднего значения срока его службы.

Аноды, установленные на нормальном значении МПР, принимают номинальную нагрузку как минимум за один день. В связи с тем, что их суммарное сопротивление меньше, чем у анодов, которое длилось 10–15 дней, ток в первом периоде несколько выше расчетного среднего значения (рис. 6).

Измерения показывают, что даже при нормальной работе электролизера распределение тока на анодах может иметь существенный интервал. Это сопряжено со многими факторами. Наиболее важным из них является полное электрическое сопротивление узла анодного блока, то есть углеродного анода, кронштейна и чугуна.

Наиболее критическим значением является ниппель-анодный контакт, падение напряжения которого может составлять от 80 до 180 мВ. Это количество зависит от состава чугуна и его усадки при кристаллизации, состояния самих ниппелей (деформация, оплавление, качество очистки и т. Д.), Недостаточной очистки гнезда ниппеля путем пересыпки кокс. Возможны нарушения на месте биметаллических пластин кронштейна. Наконец, электрическое сопротивление самих анодных блоков также имеет довольно большую дисперсию.

Несколько десятков лет назад У. Хаупин [26] подчеркнул, что анодные перенапряжения на углеродных материалах имеют разброс более 300 мВ при одной и той же плотности тока. Это стало поводом попытаться выяснить причину больших различий, поскольку уменьшение перенапряжения означает увеличение энергоэффективности. В электролизерах с обожженными [27] анодами перепад в подине варьируется в диапазоне 50-100 мВ, что является на 1-2% больше от напряжения на электролизере. Так как катодное перенапряжение по своей природе находится в зависимости от фокусирования, оно может быть уменьшено с помощью путем энергичного смешивания слоя с катодным электролитом и, в результате, может быть исключено. Для определения перенапряжений на

промышленных анодах, используемых на Российских алюминиевых заводах, проведены эксперименты в лабораторной ячейке с использованием метода гальваностатических стационарных поляризационных кривых. Результаты сопоставлены с другими свойствами углеродных блоков. Сделаны рекомендации по использованию анодного перенапряжения в качестве параметра качества углеродных блоков.

1.3 Конструкция анодных токоподводов

На сегодняшний день производители алюминия стремятся улучшить свои позиции в отношении потребления энергии и производственных затрат. Для этого математическое моделирование [28] предлагает хороший способ изучения поведения клетки в течение ее жизни. В этой статье представлена полностью связанная термоэлектромеханическая модель (TEM) цельного анодного узла в сборе. Параметрическая модель конечных элементов (FE) была разработана с использованием APDL™ (ANSYS® Parametric Design Language) и была решена с помощью приложения TESH ++ для моделирования тепловых и электрических воздействий процесса восстановления на анодную сборку. Полублочная подмодель модели полной сборки анода была использована для анализа, чтобы лучше понять систему и оценить гипотезу снижения падения анодного напряжения в анодной сборке посредством простого изменения диаметра штыря. После калибровки с экспериментальными результатами был проведен анализ чувствительности (SA), чтобы исследовать влияние изменений некоторых критических параметров на начальный воздушный зазор на границе раздела между чугуном и углеродом, следовательно, на общее падение напряжения в системе. Этими критическими параметрами были: эффективная температура заглушки при затвердевании чугуна, диаметр заглушки и коэффициент теплового расширения (КТР), которые показали, что они оказывают

незначительное или значительное влияние на общее падение напряжения в зависимости от рабочей температуры.

Извлечение алюминия имеет очень высокий процесс энергопотребления, поэтому уменьшение ее является одной из самых важных ролей в дизайне алюминиевых редуцированных ячеек. Хороший путь для достижения этой цели может быть сделан за счет экономии напряжения на анодном узле. Целью данной работы [29] является разработка трехмерной термоэлектрической конечно-элементной модели и ее влияния на основе фактических температурных измерений и электрических расчетов для анодного узла. Модель используется для оценки распределения температуры и падения анодного напряжения на анодном узле и для предложения альтернативных вариантов конструкции для снижения падения анодного напряжения. Исследовано влияние изменения диаметра заготовки и химического состава чугуна на падение анодного напряжения. Полученные данные свидетельствуют о том, что влияние диаметра заготовки более эффективно по сравнению с изменением состава чугуна.

Падение напряжения в анодном узле очень важно, так как оно непосредственно связано с производственными затратами. До 25% падения анодного напряжения приходится на сталь, литые области железа, углерода [28]. Чугун используется для соединения стальных заглушек анодных подвесок к углеродным анодам, используемым в восстановительных ячейках. Процесс соединения и фиксации углеродного анода в верхней части, которую можно видеть на рисунке 7, называются стержневыми или уплотнительными.

Аноды имеют специально разработанные отверстия, так называемые заглушки, в которые помещаются стальные заглушки и заливается расплавленное железо для соединения и фиксации заглушек к углеродным блокам. Так как чугун смачивает углерод, воздушный зазор на границе чугун-углерод открывается один раз, чугун затвердевает в процессе анодного уплотнения (стержневого). Интерфейс вызывает термическое и

электрическое контактное сопротивление, которое играет ключевую роль при выплавке алюминия.

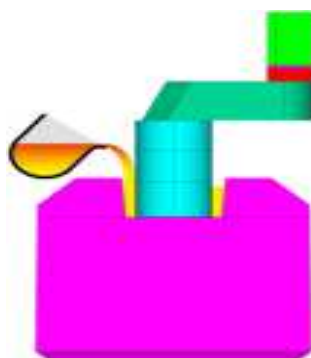


Рисунок 7 – Процесс пруткового уплотнения

1.4 Особенности моделей

Прежде всего, была разработана [50] полная модель рисунок 8 сборки анода для проведения различных анализов. Полностью параметрическая модель имеет такие характеристики, как: смещение и вращение главной детали, которые вызывают чугунные соединители с угловыми вариантами толщины; образование блинов (литых чугуна ниже заглушки); чугунные канавки; конструкции (формы) и расход углерода.

Для калибровки численной модели, а также выполнения анализов для исследования явления, происходящие в области сталь, чугун, углерод во время работы полблока модель с одним огрызком была извлечена из полной модели ради простоты. Рисунок 8 изображает геометрию полной модели и ее компонентов. Рисунок 9 демонстрирует полублочную модель. Следует отметить, что в нижней части одной заглушки была добавлена поддержка модель для адекватного представления механических граничных условий в нижней части углеродного блока.

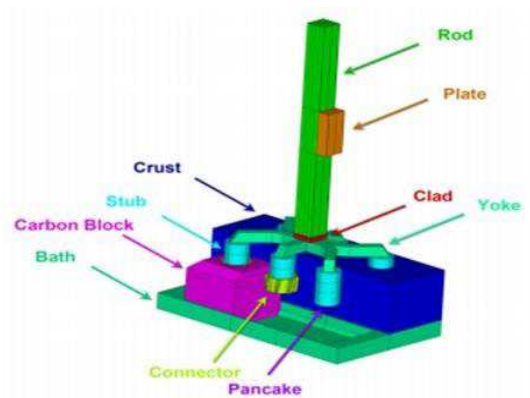


Рисунок 8 – компоненты полного анодного узла

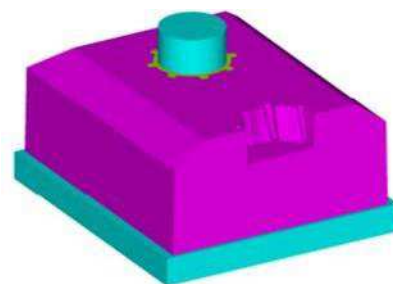


Рисунок 9 –Полублочная модель

В статье [30] рассматривается вопрос совершенствования конструкции анодных токоподводящих обожженных анодов электролизера для производства алюминия в Республике Таджикистан.

Моделирование подсистемы управления алюминиевым электролизером с обожженными анодами. Задача поставлена и цели управления определены. Дано математическое описание [31] электролизера как объекта управления. Модель электролизера и подсистемы управления встроена в пакет MatLab с использованием инструмента визуального моделирования Simulink.

Для работы [32] в эвтектической ванне NaF-AlF_3 при температуре около $750\text{ }^\circ\text{C}$, описанной в работе "легкие металлы, 1994", разрабатывается размерно-стабильный сплавной анод. Небольшой диапазон состава сплава Cu-Ni-Fe, по-видимому, имеет удовлетворительную низкую скорость анодного окисления и высокую оксидную проводимость. Скорость анодного окисления аналогична скорости окисления воздуха при той же температуре. Исследования окисления воздуха, проведенные до 6 месяцев, по-видимому, имеют удовлетворительные низкие показатели. Работа с несколькими, вертикальными, моно полярными металлическими анодами и катодами TiB_2 с пластинчатыми катодами на $0,5\text{ а/см}^2$ каждая сторона обещает 20-ти кратное

уменьшение объема ячейки по сравнению с обычными ячейками Н-Н и удельное потребление энергии 11 кВт/ кг.

В последнее время развитые страны Европы, США, Канады и др. производящие алюминий, используют технологию предварительно обожженных анодов. Такая технология применяется в основном на Таджикском и Саяногорском алюминиевых заводах. Применения этих анодов выгодно использовать, так как уменьшается перепад напряжения и уменьшается расход анодов на 30-40%, и улучшается экологичность производства электролизеров.

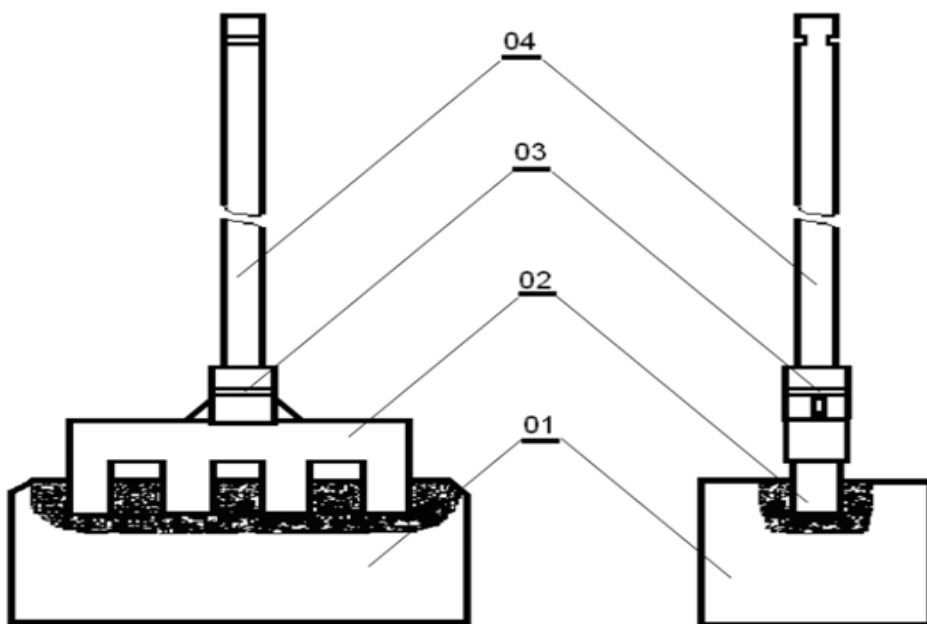
Эксперты российского института и зарубежные компании активно изучают и исследуют углерод анодов, анодной массы и материалы для катодов [33]. В опубликованных работах по исследованию анода большое внимание уделяется аноду его компоненту и изготовлению обожженных анодов.

Актуальной проблемой на сегодняшний день являются вопросы совершенствования конструкции и технологии производства анодов и анододержателя.

Формирование оптимальной конструкции навесного обожженного анода электролизного производства, был сформирован благодаря практическим экспериментам авторов данной статьи на Таджикском алюминиевом заводе [30].

Конструкция прокаленного анодного блока, используемая на международном уровне (рис. 10).

Конструкция состоит из стального кронштейна, алюминиевой пластины в биметаллической стали и стержнем анодного держателя из силумина. Данная конструкция содержит ряд конструктивных и технологических замечаний.



01 – анодный блок, 02 – кронштейн стальной, литой; 03 – вставка биметаллическая из алюминия и стали, 04 – штанга анододержателя из силумина.

Рисунок 10 – Конструкция обожженного анодного

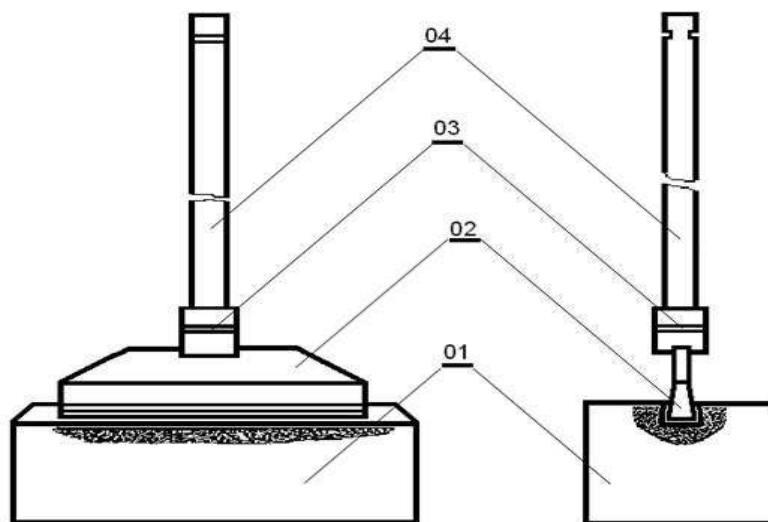
Предлагаемая новая конструкция анодного блока (рисунок 11), используемая на Таджикском алюминиевом заводе может эксплуатироваться в сочетании с существующими типовыми конструкциями анодов. Данная конструкция позволила, избавиться от существенных недостатков, таких как:

- демонтаж анодного блока,
- ремонт анодного блока,
- повторное использование элементов отработанного анодного блока.

Главные отличия между предлагаемой конструкцией собранного прокаленного анода и обычной конструкцией прокаленного анодного блока, собранного с держателем анода, заключаются в следующем:

- 1) стальная опора держателя анода, предложенная в сегменте ниппеля, имеет трапециевидную форму - усеченный перевернутый клин;
- 2) отсутствуют круглые или прямоугольные ниппели в форме опорного кронштейна;

- 3) трапецевидная канавка в анодном блоке вместо ниппельных патрубков;
- 4) анодный блок соединен с кронштейном с помощью анодной опоры без чугуна в прокаленных анодных посадочных местах.



01 – анодный блок; 02 – кронштейн стальной, литой; 03 – вставка биметаллическая из алюминия и стали; 04 – штанга анододержателя из силумина

Рисунок 11 – Конструкция обожженного анодного блока, используемая на Таджикском алюминиевом заводе

Работающие типовые конструкции анодных токоподводов на Таджикском алюминиевом заводе можно эксплуатировать вместе с предлагаемой новой конструкцией анодного токоподвода и понемногу внедрять их в будущем.

На рис. 12 показаны конструкции действующего и предлагаемого анододержателя и их размеры.

Площадь контакта, применяемого в настоящее время ниппельного кронштейна анододержателя с действующим анодным блоком, рассчитывается по формуле:

$$S_c = \pi \cdot D \cdot h \cdot n,$$

где n – число ниппелей кронштейна.

Площадь контакта, предлагаемого ниппельного кронштейна анододержателя с новым анодным блоком, рассчитывается по формуле:

$$S_H = B \cdot h \cdot n,$$

где n – число контактных поверхностей нового кронштейна.

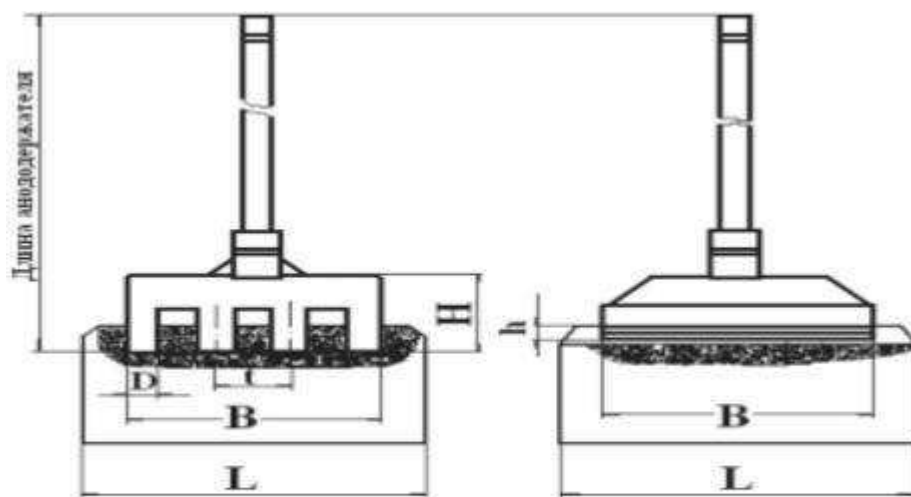


Рисунок 12 - Конструкции действующего и предлагаемого анодных токоподводов

Главные отличия между типовой и предлагаемой конструкциями обожжённого анодного блока, установленного с анододержателем отображены в таблице 2.

Таблица 2 – Габариты типового и предлагаемого анодных токоподводов

Обозначение	Габариты анода-держателя	Габаритные размеры мм	
		применяемого	предлагаемого
Длина анододержателя		2860	2760
L	длина анода	1450	1450
B	ширина кронштейна	1190	1190
H	высота кронштейна	320	340
h	высота контактной поверхности	100	100

D	диаметр ниппеля	110	-
t	расстояние между ниппелями	360	-

Как видно из приведенных выше расчетов, площадь контакта предлагаемой клиновой опоры держателя анода с анодным блоком с клиновой канавкой (S_n) практически в два раза выше площади контакта, используемой на международном уровне ниппель держателя анода с типичным анодным блоком (S_c). Это значительное увеличение площади контакта между держателем анода и анодным блоком улучшает эксплуатационные параметры источника тока анода по причине уменьшения напряжения и плотности тока в контактных узлах. В данном случае более одинаковое распределение тока будет происходить по поверхности анодного блока и нижней сегменты катодной подины, что также положительно повлияет на работу электролизера в целом.

Таким образом, использование концептуально новой конструкции контактного узла анодного блока с опорой анододержателя позволит:

1) существенно увеличить поверхность контакта «ниппель - анод», таким образом снижая падение напряжения в данном узле и обеспечивая более одинаковое распределение тока в объеме анодного блока;

2) улучшение качества и сопротивления контактного узла благодаря саморегуляции минимального зазора при контакте со стальной опорой и анодным блоком, а также различными коэффициентами объемного расширения материалов - сталь (опора) и углерод (анодный блок);

3) во избежание возможного механического повреждения всевозможных контактных узлов линии токоподводов анода при транспортировке, так как технологическая схема исключает транспортировку линии токоподвода анода в собранном виде из места установки для изготовления прокаленных анодов в алюминиевые электролизеры. Блок анода и держатель анода транспортируются отдельно;

4) обеспечивают регулируемую величину эксцентриситета анода относительно стержня держателя анода для достижения нужного расстояния между анодами в электролизере;

5) продлить цикл подачи анодного тока электролизера с 28 до 30 дней, что сопряжено с повышением на 100 мм трудовой высоты анодного блока.

В работе [34] представлен проект по совершенствованию конструкции анодной сборки алюминиевого электролизера с использованием современных систем САПР.

Авторы работ [28,35,36], спроектированных в программе ANSYS, собрали анод с различными геометрическими формами чугунного покрытия, а далее поставили вопрос об автоматическом выборе эффективного проекта в российской и зарубежной инженерной практике с использованием современных методов повышения эффективности и пакетов программного обеспечения для инженерного анализа. Таким образом, формирование универсального программного пакета, расширяющего функциональные возможности современных систем автоматического проектирования и позволяющего выбрать рациональный дизайн на базе которых установлены критериев оптимальности, представляет собой важной задачей на методы решения проблемы. В данной статье мы изучаем выбор оптимальной конструкции стальных ниппелей для экономии электроэнергии при производственном процессе алюминия. Усовершенствование конструкции анодных токоподводов (ниппелей) интересует множества исследователей, так как вопрос энергосбережения в анодной сборке решается. В работе [30] предлагается целиком сменить конструкцию ниппелей, осуществить их сплошными и трапециевидными. В этой работе метод поиска координат, реализованный в программном обеспечении COMSOL Multiphysics, использовался в качестве основного метода для оптимизации геометрических размеров ниппелей.

Токоподвод [37] содержит алюминиевую штангу и стальную траверсу, соединенные биметаллическим переходником, изготовленным

сваркой взрывом, при этом в биметаллическом переходнике, имеющем плоскую границу раздела сталь - алюминий, выполнено конусно-цилиндрическое отверстие в центральной области, в котором размещена стальная заклепка для усиления соединения металлов. При этом конусная часть расположена в алюминиевой части переходника и по высоте совпадает с ее толщиной, а цилиндрическая - в стальной, и по высоте совпадает с ее толщиной, максимальный диаметр конусной части заклепки превышает диаметр ее цилиндрической части на 40-60%. В способ изготовления переходника включают поэтапное плакирование стали алюминием перед соединением алюминиевой штанги и стальной траверсы, выполнение со стороны стальной части по центру цилиндрического отверстия на глубину, равную ее толщине, а в алюминиевой части аксиально выполняют конусное отверстие, в полученное конусно-цилиндрическое отверстие помещают стальную заклепку, совпадающую с ним по форме и размерам, подпрессовывают и фиксируют по торцу цилиндрической части. Обеспечивается упрощение конструкции сталь-алюминиевого переходника и изготовление токоподвода с одновременным увеличением его эксплуатационной надежности, долговечности и снижение потерь электроэнергии.

Анодное устройство имеет очень конструктивно сложную в электролизере, работающую при высоких тепловых и электрических нагрузках.

Анодный блок алюминиевого электролизера предназначен для подачи тока в зону прямого хода процесса электролиза. Ток подается на анод через кремниевый стержень, соединенный со стальными ниппелями с биметаллической прокладкой, которая установлена на верхние сегменты корпуса анода.

При выборе конструкции было решено остановиться на варианте с тремя ниппелями анодной сборки. Проектное решение, показанное на рисунке 13, имеется трехмерная параметрическая модель анодной сборки с

тремя ниппелями и электролитной средой (рис. 14), разработанную с использованием программного пакета SolidWorks.

Чтобы выполнить стационарные термоэлектрические определения анодной системы и выявить оптимальную конструкцию ниппелей, нужно определить начальные и граничные условия.

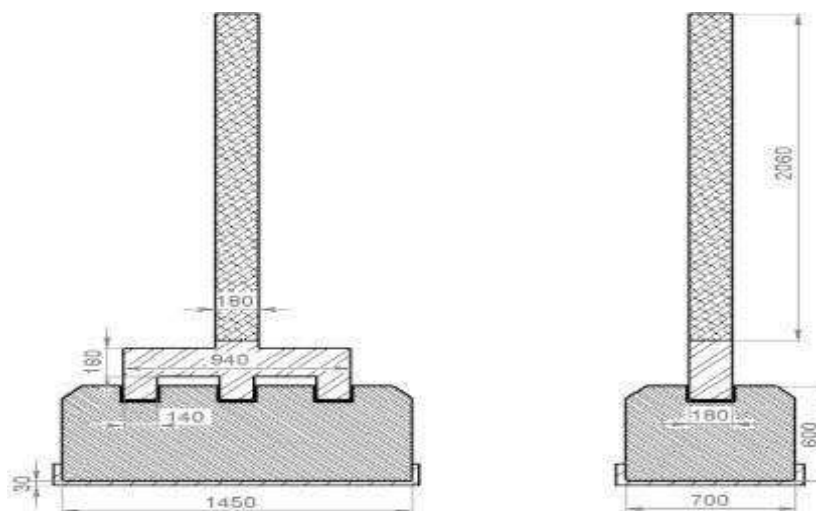


Рисунок 13 – Трех ниппельный анод

Эта модель использует два начальных условия, одно для электрического расчета - возможность для всей модели равен 0, а другое для теплового расчета - начальная температура для всей модели представляет 20 °С.

Граничные условия для электрического расчета состоят из нулевого потенциала, приложенного к нижней стороне электролита, и тока 8000 А., приложенного к алюминиевому стержню. Граничное условие для теплового расчета определяется как проблема теплопередачи любого сегмента анодного устройства с окружающей средой (рис. 15). Для всевозможных поверхностей, которые передают тепло в окружающую среду, относительный показатель теплопередачи представляет 12 Вт м2К, кроме поверхностей, которые относятся к зоне электролита, где относительный показатель теплопередачи представляет 500 Вт м2К.

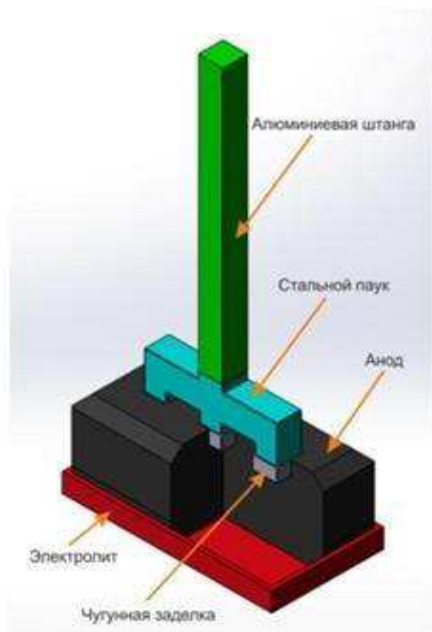


Рисунок 14 – Модель анодного узла

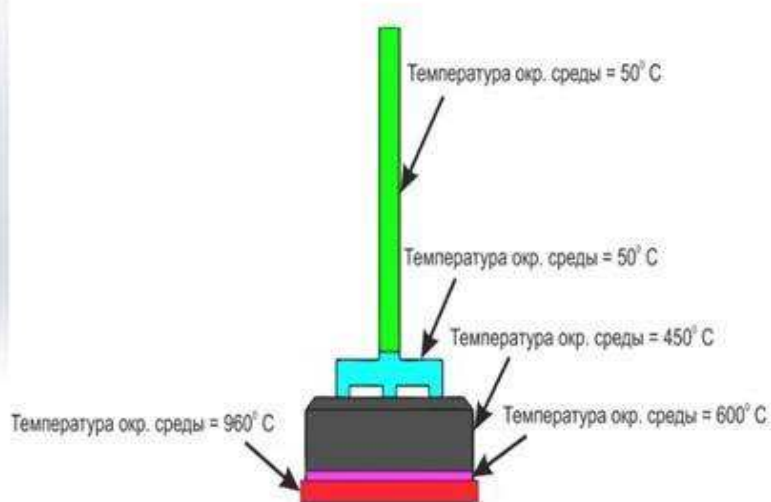


Рисунок 15 – Анодный узел теплового обмена с окружающей средой

Результаты стационарных расчетов анодного комплекса приведены на рис. 16 и 17.

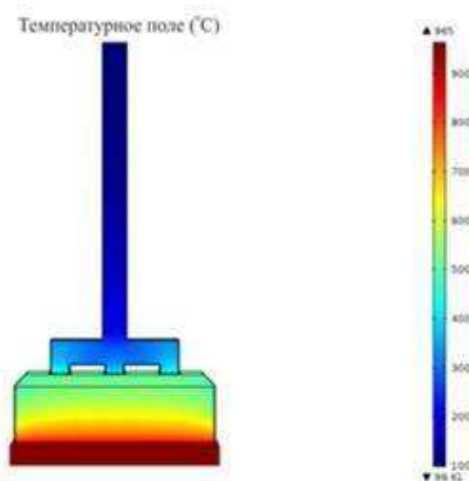


Рисунок 16 – Температурное поле анодного узла

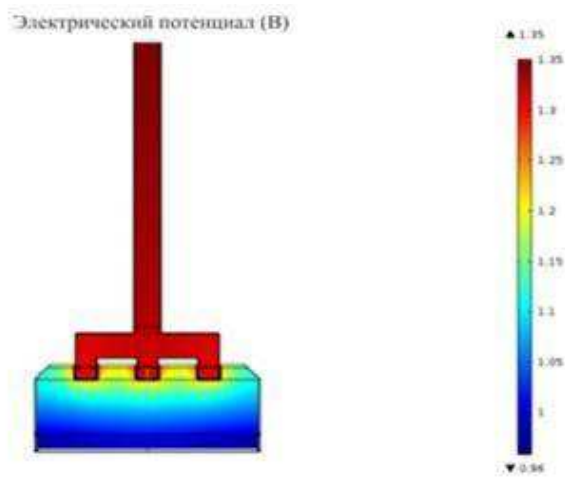


Рисунок 17 – Расположение потенциалов в анодном узле

Значения проектных переменных, которые рассчитаны с использованием метода выборки на электронные модели:

- МПР 30 мм
- Ширина 140 мм
- Толщина стального паука 180 мм
- Средняя температура в электролите 961 °С
- Средняя температура в аноде 712 °С
- Средняя температура в стальном пауке 348 °С
- Площадь верхних поверхностей 3,9 м²
- Тепловой поток с верхних поверхностей 5474 Вт
- Разность потенциалов между анодом и алюминиевой штангой 0,38 В
- Мощность между анодом и алюминиевой штангой 3037 Вт
- Разность потенциалов в электролите 0,97 В
- Мощность в зоне электролита 7770 Вт
- Целевая функция 16282 Вт

После осуществления главных расчетов возникло формирование целевой функции, выбор контролируемых параметров и ограничений, наложенных на модель.

Целевая функция заключается из трех элементов: тепловой поток от верхних поверхностей анодного узла, мощность между подошвой анода и верхней частью силицинового стержня и мощность в сфере электролита.

На рис. 18 показывает тепловое и электрическое поля в анодной сборке после процесса повышения эффективности.

Минимум целевой функции достигается с помощью изменения размера стального паука, а также с помощью изменения амплитуды МПР, но изменение МПР также нужно, дабы температура была в диапазоне от 960 до 963 °С.

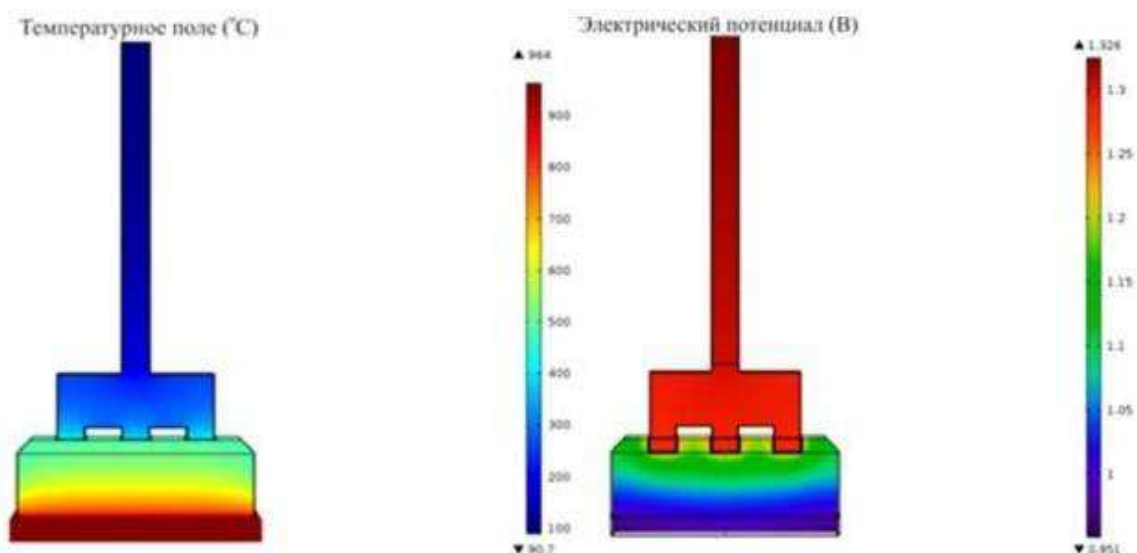


Рисунок 18 – Тепловое и электрическое поле в анодном узле

Приведены значения проектных переменных, которые получены по причине процесса повышения эффективности.

- ✓ МПР 30 мм
- ✓ Ширина ниппелей 193 мм
- ✓ Толщина стального паука 345 мм
- ✓ Средняя температура в электролите 960 °С
- ✓ Средняя температура в аноде 702 °С
- ✓ Средняя температура в стальном пауке 299 °С
- ✓ Площадь верхних поверхностей 4,3818 м²
- ✓ Тепловой поток с верхних поверхностей 5494 Вт
- ✓ Разность потенциалов между анодом и алюминиевой штангой 0,35981 В
- ✓ Мощность между анодом и алюминиевой штангой 2878 Вт
- ✓ Разность потенциалов в электролите 0,96580 В
- ✓ Мощность в зоне электролита 7726 Вт
- ✓ Целевая функция 16099 Вт

В результате повышения эффективности главного стационарного расчета были получены геометрические размеры стального паука, которые существенно отличаются от исходных значений. Хотя значение целевой функции лишь уменьшилось только на 200 Вт, что очень несущественно по сравнению со значением целевой функции, потребление энергии уменьшилось, а температура во всевозможных конструктивных элементах анодного комплекта снизилась.

Компания Outotec [38] имеет 30-летний опыт в разработке оборудования и установок для анодно-монтажных отделений алюминиевых предприятий. Компания предлагает полный спектр технологического оборудования для анодно-монтажных отделений и вспомогательных цехов. В статье приводится описание современного оборудования и технологий, которые компания Outotec предлагает для данных технологических участков.

Мировые энергозатраты [39] растут ежегодно на 1,6%, что к 2030 г. приведет к повышению потребления энергии на 45%, несмотря на внедрение энергосберегающих технологий. На цветную металлургию приходится ~6,5% (62 ТВт·ч/г) энергозатрат в производственных областях, из которых ~70% падает на электролиз. С 1990 до 2008 г. ежегодное уд. потребление энергии в отрасли на 1 т продукции сократилось с 10,2 до 7,5 МВт·ч (на 26,2%).

Мною была рассмотрена работа [40] технические решения, принципы проектирования, этапы разработки и первые результаты испытаний энергоэффективного анодного устройства электролизера РА-167 АО "РУСАЛ Новокузнецк". Приведены результаты математического моделирования, на основании которых велась разработка технических решений, заложенных в данную конструкцию. Представлено сравнение ожидаемых результатов работы и первых показателей эксплуатации электролизера с энергоэффективным анодным устройством.

Механизм изготовления алюминия очень энергоемкий, поэтому уменьшения потребления энергии представляет собой одной из основных задач при разработке алюминиевого электролизера. Одним из способов

экономии электроэнергии может быть уменьшение падения напряжения путем изменения конструкции анода и стального паука. Разработка альтернативной трехмерной термоэлектрической модели конечно-элементного набора анодов с использованием современных методов оптимизации и обоснование ее энергоэффективности путем измерения температур и разностей электрических потенциалов. Разработанная модель конечных элементов применяются для оценки распределения температуры и электрического потенциала, а также для оценки идеальных структурных изменений в анодной сборке для снижения общего совокупного анодного напряжения.

1.5 Создание альтернативной трехмерной модели стального паука в анодном узле

Анодный узел имеется конструктивно не простой элемент [41] электролизера (рис. 19), который работает в промежутке высоких тепловых и электрических нагрузок. Анод заключается из алюминиевого стержня, биметаллического прокладки, стального кронштейна с тремя ниппелями, чугуна и анодного блока, как на рис. 20, а также засыпки из оксида алюминия, не показанного на данном рисунке.

Металлическая опора [42] с различным количеством ниппелей (токовые подводы, погруженные в блоки углеродного анода, которые соединены с ним чугунной заливкой), так называемый стальной паук, предназначена для подачи тока на блок. Углеродный анод, который работает в зоне процесса прямого электролиза. Ток подается на анод с помощью алюминиевого стержня, соединенного со стальным пауком биметаллическим уплотнением.

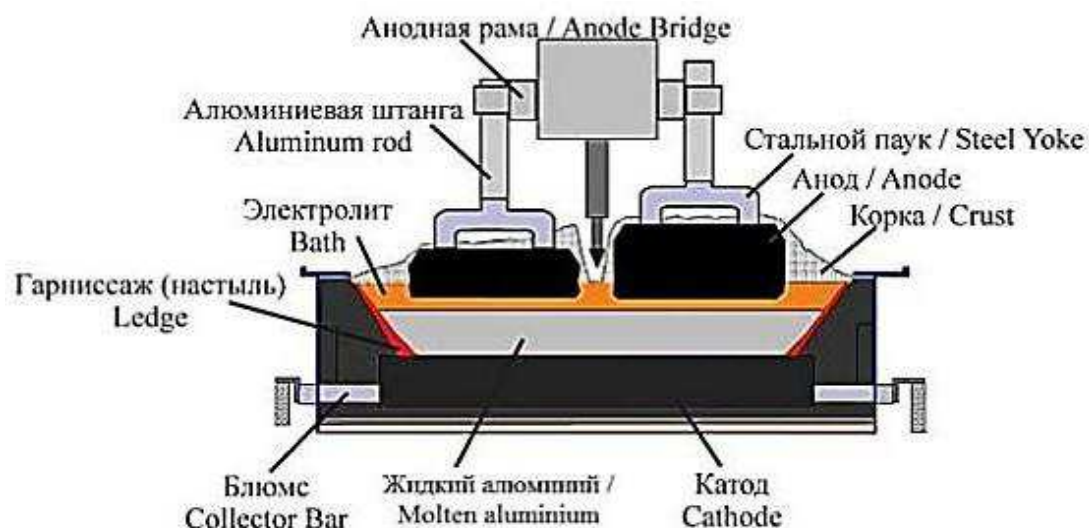


Рисунок. 19 – Конструкция электролизера.

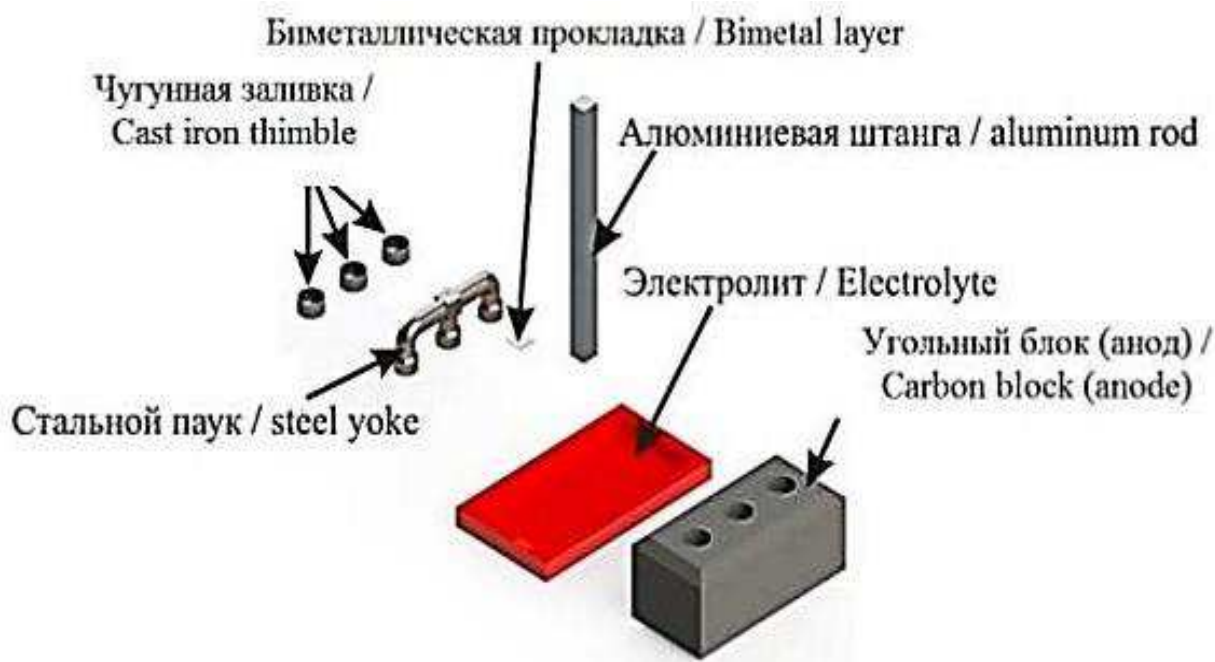


Рисунок 20 – Анодный узел

Применение пиролиза в жидком металле для модифицирования угольных анодов [43]. Эта статья посвящена экспериментальному исследованию процессов импрегнации исходных и пиролиза импрегнированных образцов обожженных анодов, проводимых для повышения их коррозионной стойкости. Промышленное производство первичного алюминия осуществляется электролизом металлургического глинозема (оксида алюминия Al_2O_3) в криолитовом расплаве ($3NaF \cdot AlF_3$).

Этот процесс осуществляется в электролизерах с углеродными катодом и анодом. Существующие проблемы в алюминиевой промышленности, в той или иной степени, связаны с работой анодов в электролизерах. По разным источникам, затраты на обожженные аноды в себестоимости алюминия составляют от 15 до 17 %, достигая 25 %. Одним из путей решения этой проблемы является улучшение технико-экономических показателей свойств анода, что требует применения инновационных технологий для его производства.

В настоящей работе предлагается принципиально новый технологический подход к созданию обожженных анодов нового поколения. С целью повышения коррозионной стойкости обожженных анодов предлагается проводить процесс модифицирования готовых образцов обожженных анодов методом импрегнирования органических соединений (на основе битума) и последующего их высокотемпературного пиролиза в расплаве металла (синец – висмут). Повышение коррозионной стойкости анода обуславливается протеканием физико-химических процессов, результатом которых является уменьшение общей, открытой и закрытой пористости, повышение кажущейся и истинной плотности, повышение плотности контактов между компонентами системы за счет адгезионных и химических сил взаимодействия, залечивание дефектов структуры анодной матрицы; предотвращение распространения микротрещин в аноде.

В данной статье [44] о наноструктуре в алюминиевой промышленности представлены: результаты исследований, связанных с областью науки на стыке металлургии, наноматериалов и экологии. Основываясь на теоретических концепциях и известной практике модификации серого чугуна, он считается новым ультрадисперсным модификатором, содержащим углерод с большей химической активностью. Было обнаружено, что углеродная пена, электролитическая пыль от электростатических осадителей и глинозем, прошедшие через систему очистки сухим газом, содержат углеродные наноструктуры. Дано описание

сырья для получения модифицирующей добавки, методов и материалов экспериментов. Представлены результаты серии чугуновых сплавов с различным содержанием модификатора и способа его введения при превращении 50% стандартного металлургического графита в углеродсодержащую часть углеродной пены. Учтено влияние модификатора на фазообразование при затвердевании серого чугуна жидкого состояния. Образцы испытательного чугуна и чугуна свидетеля были проанализированы на химический состав, а также на анализ механических характеристик. Выяснилось, что модификатор позволяет увеличить тип / марку серого чугуна. Предложен теоретический механизм образования углеродных нанотрубок при производстве алюминия. Представлена технология извлечения углеродных структур из сырья. Показано, что при получении одной тонны алюминия с использованием разработанных технологических решений для обезвреживания и утилизации промышленных отходов становится возможным получение модификатора на основе высокоорганизованных углеродных наноструктур.

В настоящее время очень перспективной технологией [45] создания покрытия с универсальными свойствами поверхностного слоя, которая сочетает в себе высокую износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость и эрозионную стойкость, представляет собой окисление частиц микродуговых частиц (МДО), может использоваться при производственном процессе комплектующих и деталей для разных сфер. Но улучшение данной технологии в направлении увеличения триботехнических свойств покрытий МДО помогает не лишь только увеличить экономический эффект, но и расширить отрасль его использования.

КЭМ – анализ падения напряжения в анодном соединителе показал [46], что в течении всего срока службы стальные заготовки подвергаются воздействию чрезвычайно агрессивной среды, включающей термомеханические напряжения и химические атаки, что приводит к изменению их формы. Эти явления влияют на термоэлектромеханический

контакт на границе углерод, чугун, сталь и оказывают существенное влияние на падение анодного напряжения. Для оценки этого падения напряжения была разработана и решена с помощью собственного кода FESh++ трехмерная конечно-элементная модель (КЭМ) целого анода. Различные модели формы шлейфа, представляющие собой деградацию, были сопоставлены с новым шлейфом для определения вариаций падения напряжения.

1.6 Медная вставка в стальном пауке

Чертеж стального паука с медной вставкой, предложенный автором работы [47]. Медь уже используется в алюминиевых электролизерах в качестве вставок в стальные катодные коллекторные стержни с целью снижения падения катодного напряжения. С такой же целью Storvik конструировало и изготовило хомуты анода сердечника литой стали-меди. Эта компания совместно с партнерами разработала способ объединения меди и стали путем литья. Этот метод весьма отличается от обычных методов, используемых в настоящее время в алюминиевой промышленности (сверление и нагрев пушки), что невозможно для анодных хомутов. В данной работе представлены результаты математического моделирования и лабораторного эксперимента с использованием литых сталемедных стержневых анодных пауков. Моделирование показало 43 % снижение падения напряжения в медном сердечнике паука по сравнению со стандартным стальным пауком. Лабораторные испытания показывают уменьшение падения напряжения тока на 29 % даже если образец имел дефектные отливки. Методом литья достигается 100 % молекулярная связь металлов с частицами железа, проникающими на несколько миллиметров в медь, после чего частицы меди проникают на 20 мкм в железо на границе раздела двух металлов. В настоящее время компания Storvik готовит полномасштабное промышленное испытание на плавильном заводе.

На рис. 21 представлен стального паука с медной вставкой.



Рисунок – 21 Стального паука с медной вставкой.

Результаты конечно-элементного анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3 –Параметры конструкций стального паука с медной и без медной

Параметр	Конструкция стального паука	
	Без медной вставки	С медной вставкой
Межполюсное расстояние, мм	45	45
Диаметр ниппелей, мм	140	140
Сила тока в аноде, кА	8,5	8,5
Температура электролита, °С	961,19	960,29
Падение напряжения в аноде, В	0,490	0,454
В штанге	0,033	0,033
В зоне контакта штанга-паук	0,026	0,026
В стальном пауке	0,069	0,032
В зоне контакта ниппель-анод	0,125	0,126
В теле анода	0,237	0,237
Падение напряжение в электролите, В	1,39	1,39

Сравнительный анализ данных представлен в таблице 4 показано, что при использовании медной вставки общее напряжение на аноде уменьшается приблизительно на 40 мВ. Это сопряжено с тем, что по сравнению со сталью медь представляет собой электрической и теплопроводной (теплопроводность стали в 8 раз ниже, чем у меди).

Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) и электрическое возможное поле (В), которые выявлены с помощью осуществления термоэлектрического анализа методом конечных элементов, показаны на рис. 22 и 23.

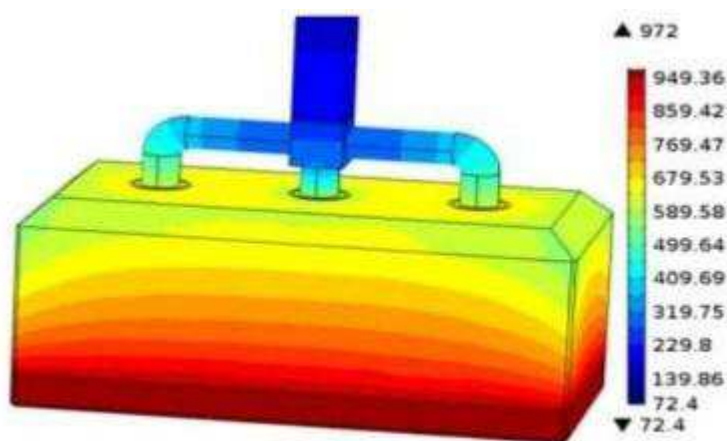


Рисунок – 22 Электрическое поле с медной вставкой

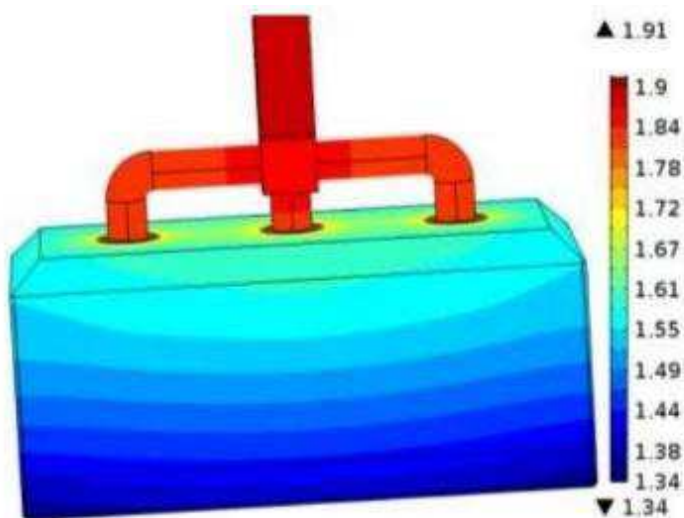


Рисунок – 23 Электрического потенциал с медной вставкой

Из всех конструкций самой выгодной в плане экономии электроэнергии является конструкция с однонипельным анодом, но и анод с медным сердечником показал себя довольно неплохо. Ранее проведенные исследования показали, что при увеличении нипельного кронштейна с медной вставкой ведет к уменьшению перепада нипель анода. Поэтому за счет увеличения диаметра медного сердечника на 180 мм еще больше уменьшится перепад напряжения в нипель аноде.

Достижение экономии [48] напряжения на анодном узле в алюминиевом восстановительном элементе, в частности на анодном соединении, является целесообразным подходом в рамках более широкой программы улучшения энергоэффективности. Эксперименты, проводимые с использованием работающих элементов, очень сложны и дорогостоящи. Однако моделирование методом конечных элементов, используемое в этом исследовании, является экономически эффективным и точным методом для понимания поведения анодного соединения и выявления ограничений на экономию напряжения. Данное исследование рассматривает влияние износа штифта и жесткости хомута на анодное соединение и, следовательно, на производительность анодного узла. Найден идеальный диаметр заготовки для исследуемой конфигурации, а также выявлены повышенные перепады напряжения для различных уровней износа заготовки. Полученные результаты показывают, что кронштейн нипель с уменьшенной высотой и, следовательно, уменьшенной жесткостью уменьшает растягивающее напряжение, развиваемое в углеродном аноде, что снижает риск возникновения анодных трещин.

Выводы по разделу 1

Из перечисленных в литературном обзоре вариантов было предложено изменение конструкции анододержателя (однонипельный и трехнипельный с утолщением кронштейна и тд.). Как установлено, эти

конструкции показали себя довольно неплохо, но имеется ряд проблем по трудоемким, дорогостоящим технологиям изготовления (монтажа, демонтажа, ремонта, использования вновь элементов отработанного анодного токоподвода). Наша задача – испытать мало затратные материалы без изменения конструкции.

В данной работе предлагаются следующие изменения в ниппельной заливке:

- использование графитовой суспензии на поверхности ниппеля;
- использование медного купороса;
- установка стальных пластин с высоким КТЛР.

При установке новых вариантов соединения анододержателя с угольным анодом следует ожидать снижение потерь электроэнергии при производстве алюминия на электролизерах ОА за счет изменения конструкции соединения «токоподвод – угольный анод», снижение электрического сопротивления системы анододержатель – угольный анод за счет соединения стального токоподвода с углеродом.

Новый вариант должен обеспечивать возможность плавного перехода в условиях действующего производства (анодное производство, электролизное производство), общий уровень затрат на реализацию должен составлять не более 25\$/ тонну алюминия с учетом НИР, ПИР.

[изъято 25 страниц]

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

 Н.В. Белоусова

« 10 » 07 2020г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

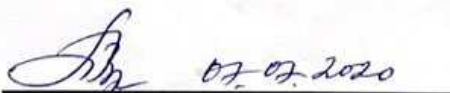
«Повышение энергетической эффективности высокотемпературных
электролизёров за счет контакта «анододержатель – угольный анод»

Руководитель


Подпись дата

д-р хим. наук, профессор
Н.В. Белоусова

Консультант по
экономической
части


Подпись дата

канд. экон. наук, доцент
Г.В. Твердохлебова

Магистрант


Подпись дата

Р.В. Биль

Рецензент


Подпись дата

Директор департамента
технологии и
технологического
развития алюминиевого
производства САЗ
А.Н. Анисиферов

11.06.2020г.

Красноярск 2020 год