

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 алюминиевых электролизеров  
путем снижения потерь напряжения в контактных узлах»

Руководитель	_____	канд. техн. наук, доцент Е.Д. Кравцова
	Подпись дата	
Консультант по экономической части	_____	канд. экон. наук, доцент Т.В. Твердохлебова
	Подпись дата	
Магистрант	_____	Д.В. Калинин
	Подпись дата	
Рецензент	_____	Менеджер проекта «Создание технологии РА-550» ООО «РУСАЛ ИТЦ» И.И. Пузанов
	Подпись дата	

Красноярск 2020 год

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации по теме «Повышение энергетической эффективности алюминиевых электролизеров путем снижения потерь напряжения в контактных узлах» содержит 81 страницу текстового документа, в том числе 39 иллюстраций, 10 таблиц, без приложений. Список использованных источников содержит 51 наименование.

Цель исследования – повышение энергетической эффективности электролизеров для получения первичного алюминия за счет совершенствования контактных узлов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ известных методов, применяющихся в контактных узлах алюминиевого электролизера; обработаны технологические данные по падению напряжения в конструктивных элементах электролизёра за последние 15 лет; проведены эксперименты по модернизации контактных соединений алюминиевого электролизера.

Результаты проведенных исследований подтвердили, что при использовании соединения штанги с кронштейном, путем приварки штанги к биметаллической плите анододержателя комплексным методом, с применением горизонтальных и вертикальных биметаллических пластин, можно достичь снижения расхода электроэнергии на 47 кВт на тонну алюминия.

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ, АНОДОДЕРЖАТЕЛЬ, АНОДНОЕ УСТРОЙСТВО, АЛЮМИНИЕВАЯ ШТАНГА, СТАЛЬНОЙ КРОНШТЕЙН

## СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ .....	1
СОДЕРЖАНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Обзор известных технических решений, направленных на сокращение энергопотребления в контактных узлах при электролитическом производстве алюминия .....	6
1.1 Применение углеродных многослойных нанотрубок в контакте «чугунный ниппель – обожженный анодный блок» .....	7
1.2 Энергоэффективная конструкция анододержателя.....	12
1.3 Повышение качества контактного соединения «угольный анод–шина» ...	13
1.4 Чугун для заливки анодов с оптимизированным составом без добавления фосфора .....	15
1.5 Замена в разъемных контактных соединениях болтовых стяжек на разрезные цилиндрические контактные вставки.....	21
1.6 Уменьшение сопротивления в узле «гибкий катодный спуск – катодная шина».....	23
1.7 Переходники для соединения катодного спуска с блюмсом .....	25
1.8 Соединение кронштейна и алюминиевой штанги .....	26
1.9 Медные вставки в блюмсы катодов .....	28
1.10 Энергосберегающие конструкции электролизеров .....	28
Выводы по разделу 1.....	30
2 Методы измерения падения напряжения и расчет электрического баланса электролизёров АО «РУСАЛ Саяногорск».....	31
2.1 Электрический баланс алюминиевого электролизера.....	31
2.2 Порядок проведения измерений падения напряжения.....	33
2.3 Расчёт составляющих электрического баланса .....	46
Выводы по разделу 2.....	46
3 Прочностной анализ биметаллических пластин анододержателей алюминиевых электролизеров с обожженными анодами .....	47
Выводы по разделу 3.....	54

4 Повышение надежности и снижение потерь электроэнергии в соединении «алюминиевая штанга – стальной кронштейн».....	56
Выводы по разделу 4 .....	66
5 Техничко-экономическая оценка предложенных мероприятий.....	67
Выводы по разделу 5 .....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	76

## ВВЕДЕНИЕ

Для получения алюминия требуются большие затраты электроэнергии, поэтому для обеспечения конкурентоспособности предприятия, снижение расхода электроэнергии является приоритетной задачей. В Сибири одним из основных потребителей электроэнергии является алюминиевая промышленность. При производстве 1 тонны металла в электролизерах с предварительно обожженным анодными блоками расходуется 13000–14500 кВт·ч электроэнергии. Низкая энергетическая эффективность алюминиевых электролизеров, которая за частую не превышает 45 %, и является следствием высокого энергопотребления, где большая часть расходуемой энергии рассеивается через его поверхности в виде тепла в атмосферу цеха, расходуется на преодоление сопротивления газосодержащего слоя электролита и контактных соединений в узлах. В общей сложности в России, алюминиевая промышленность на выпуск около 4 млн. т/год металла расходует более 66 млрд. кВт·ч электроэнергии. В связи с этим, актуальной научной проблемой является разработка технических и технологических решений по повышению энергетической эффективности для производства первичного алюминия, обеспечивающих снижение затрат электроэнергии на тонну продукции. В связи с этим, исследования и поиск технических решений, в направлении повышения энергоэффективности алюминиевого производства и снижения затрат электроэнергии электролизерами приобретают особую актуальность.

Развитие технологии электролиза с предварительно обожженными анодными блоками в текущем и будущем времени рассматривается в большей степени с позиции снижения энергоемкости процесса, снижения капитальных затрат на строительство новых производственных мощностей, оптимизации и стандартизации операционных затрат на ведение технологического процесса и улучшения экологических показателей. Все это в первую очередь связано с непрерывным, желательно мало затратным и быстро реализуемым поиском улучшений в конструктивных элементах электролизера. Затраты электроэнергии

складываются из трех основных составляющих [1]: напряжение разложения для протекания реакций; катодные процессы; падение напряжений в контактах.

Одна из основных причин увеличения энергопотерь в электролизере напрямую связана с потерями напряжения в контактных узлах. Затраты электроэнергии прямо пропорциональны падению напряжения в контактах, это позволяет напрямую влиять и управлять ими.

В данной работе предлагается рассмотреть пути повышения энергетической эффективности алюминиевых электролизеров при получении первичного алюминия на основе совершенствования контактных узлов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор литературных источников на предмет поиска методов, применимых для соединения в контактных узлах;
- провести сбор и обработку технологических данных по падению напряжения в конструктивных элементах электролизёра за последние 15 лет;
- провести модернизацию контактных соединений алюминиевого электролизера «штанга – кронштейн», путем приварки штанги к биметаллической плите анододержателя комплексным методом, с применением горизонтальных и вертикальных биметаллических пластин.

Предполагаемый эффект от внедрения данных мероприятий основан на снижении расхода технологической электроэнергии на 47,5 кВт·ч на тонну алюминия.

## **1 Обзор известных технических решений, направленных на сокращение энергопотребления в контактных узлах при электролитическом производстве алюминия**

Для уменьшения энергопотребления, которое составляет 25–35 % в корзине себестоимости производства алюминия – сырца, а также минимизации отрицательного воздействия на экологию, вновь вводимые производственные мощности комплектуются электролизерами с предварительно обожженными анодами: Саяногорский алюминиевый завод, Хакасский алюминиевый завод, Богучанский алюминиевый завод, Тайшетский алюминиевый завод, Иркутский алюминиевый завод (на базе серии № 5). По этой же технологии модернизируются корпуса на действующих производствах: модернизация корпусов №7, 25 Красноярского алюминиевого завода, перевод электролизеров типа С–2, С–3 с верхним токоподводом Новокузнецкого алюминиевого завода, где на данный момент переведено на новую технологию 25 электролизеров. Тем не менее, данные мероприятия не дают желаемого эффекта снижения расхода электроэнергии. Энергетический коэффициент полезного действия электролизеров с верхним токоподводом, согласно данным [2], составляет 45 %, электролизеров с предварительно обожженными анодами – 54 %, что не является желаемым показателем. Из этого следует, что исследования и поиск технических решений, способствующих повышению энергоэффективности алюминиевого производства и снижению энергопотребления электролизерами, приобретают особую актуальность.

В работе [3] представлен обзор известных исследований и технических решений, направленных на сокращение энергопотребления электролизерами при производстве алюминия – сырца, в том числе некоторые решения и предложения, способные значительно повысить энергетическую эффективность алюминиевого производства в целом, снизить удельный расход электроэнергии при производстве алюминия в электролизерах с предварительно обожженным анодом, за счет снижения падения напряжения в контактных узлах.

## 1.1 Применение углеродных многослойных нанотрубок в контакте «чугунный ниппель – обожженный анодный блок»

Перепад напряжения в контакте «чугунный ниппель – обожженный анодный блок» составляет 160–172 мВ, и показывает показатели в верхнюю сторону из-за химического взаимодействия чугуна, который является основным материалом для заливки ниппельных гнезд. Коррозия чугуна обуславливается взаимодействием с  $SO_2$  и электролита, который попадает на верхнюю часть обожженного анодного блока. Примеры зон повышенной химической коррозии ниппелей изображены на рисунке 1.

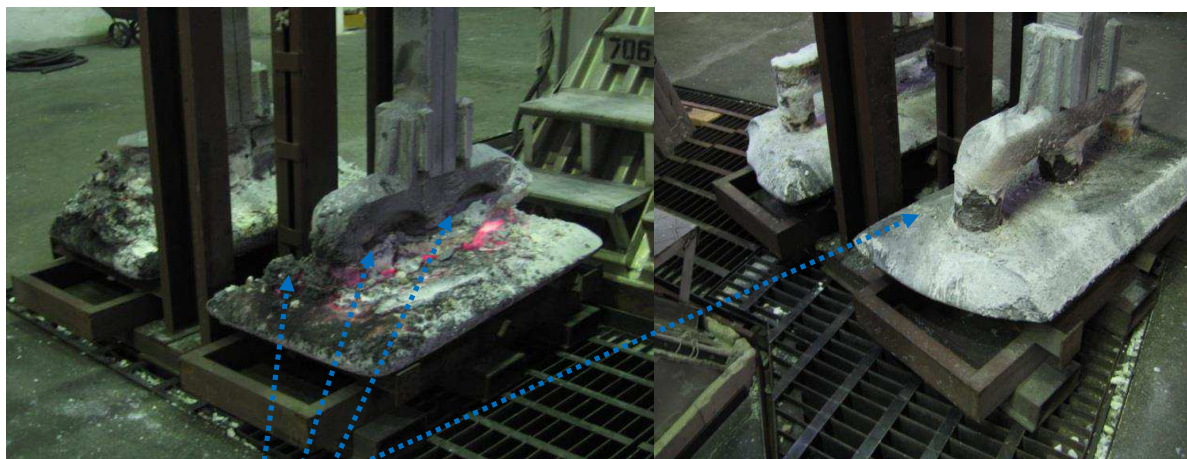


Рисунок 1 – Зоны повышенной химической коррозии ниппелей  
анодов

Бывает и проникающая коррозия, из-за наличия трещин в теле анодного блока, изображенная на рисунке 2. Такое разрушение ниппеля приводит к образованию электрического сопротивления границе «чугун ниппеля – тело анодного блока», из-за чего идет загрязнение алюминия железом, тем самым снижается его сортность.



На базе национального исследовательского Иркутского технического университета был апробирован в качестве альтернативного материала для заливки ниппелей, чугуна, с добавлением nano частиц углерода [4].



Рисунок 2 – Поперечная трещина огарка

Производство чугуна осуществлялась на опытном участке (рисунок 3), в обычном режиме выплавки, в соответствии с текущей технологией. В операции производства чугуна был скорректирован единственный параметр – произведена замена 50 % стандартного металлургического графита на графитизированный углерод с содержанием 0,1 масс. % углеродных многослойных нанотрубок, фотографии которых изображены на рисунке 4. Выплавка проводилась в течение 2,5 часов при температуре 1500 °С, при введении в середине процесса графитизированного углерода с нанотрубками.



1 – система газоотвода, 2 – оптический регистратор температуры шихты (пирометр),  
 3 – электропитающий агрегат, 4 – емкость для продуктов опытных плавов,  
 5 – индукционная печь

Рисунок 3 – Опытно–промышленный участок

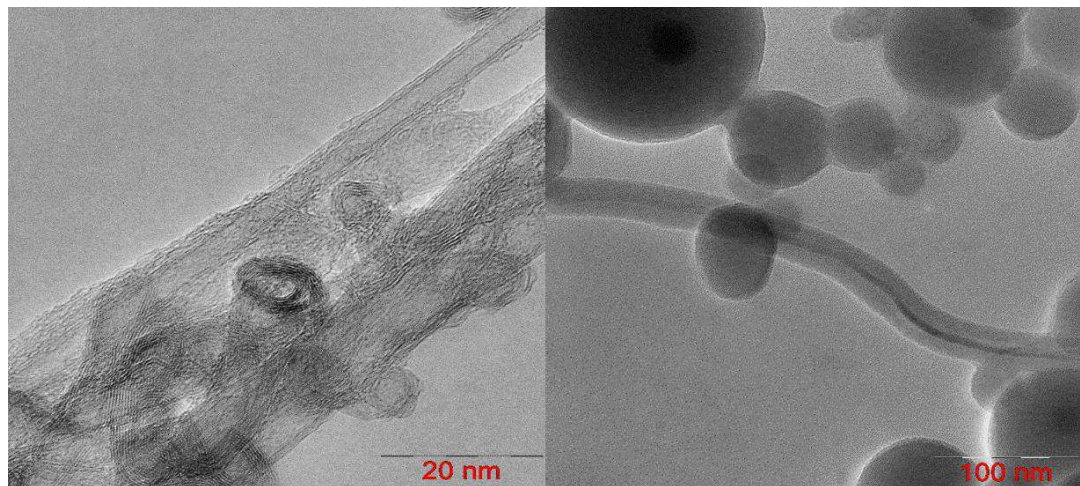


Рисунок 4 – Фотографии углеродных нанотрубок, полученные при помощи просвечивающей электронной микроскопии

Эффект нанотрубок заключается в улучшении механической прочности материалов, повышении электропроводности и антикоррозионных свойств. Анализ физических характеристик показывает, что в сравнении с чугуном

свидетелем и имеет более прочный предел на разрыв 66 кН, против 51 кН у рядового чугуна. Вид зерна чугуна в месте разрыва приведен на рисунке 5.



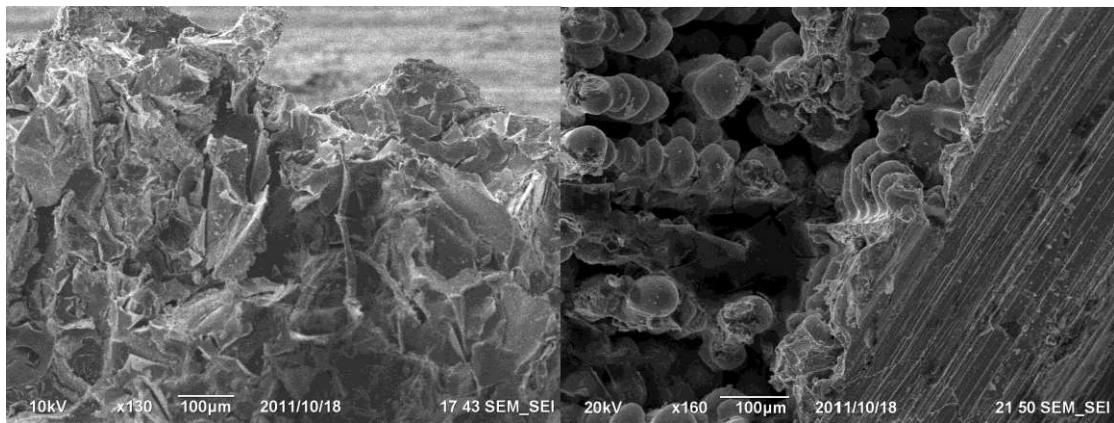
а)

б)

Рисунок 5 – Вид зерна чугуна в месте разрыва: модифицированный чугун (более мелкое зерно) (а), чугун – свидетель (более крупное зерно) (б)

Многочисленные апробирования металлов проведены с использованием электронного сканирующего микроскопа. Полученные изображения (рисунок б), показывают изменение кристаллической структуры чугуна. Модификация при помощи углеродных наноструктур позволила добиться более упорядоченной кристаллической структуры с выраженным направлением кристаллизации.





а)

б)

Рисунок 6 – Фотографии проб методом сканирующей электронной микроскопии: обычный чугун (а), наномодифицированный чугун (б)

Проверка антикоррозионных свойств модифицированного чугуна проведена с использованием смеси разбавленных растворов плавиковой и серной кислот. Весовой анализ показал, что при их воздействии уменьшение массы модифицированного чугуна на 16 % меньше, чем у рядового чугуна. Внешний вид проб после кислотной обработки приведен на рисунке 7, микрофотографии поверхности – на рисунке 8.

Испытания электропроводящих свойств показали, что ожидаемое снижение перепада напряжения в контакте «чугунный ниппель – анодный блок» достигнет величины 89–96 мВ. Таким образом, возможно снизить удельный расход электроэнергии, потребляемыми электролизерами с обожженными анодными блоками при производстве одной тонны алюминия – сырца на 30–45 кВт·ч.



Рисунок 7 – Внешний вид проб чугуна после кислотной обработки

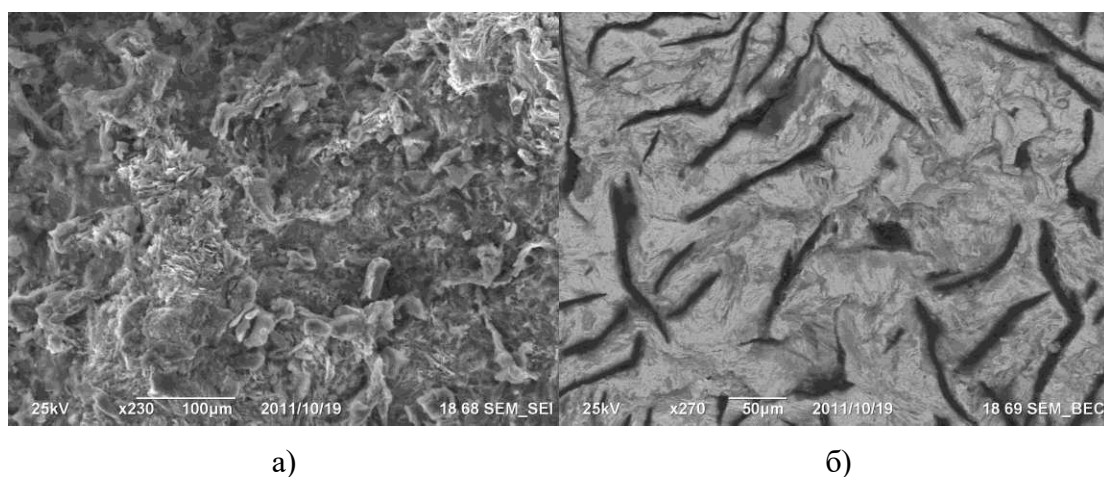


Рисунок 8 – Фотографии проб после кислотной обработки, полученные методом сканирующей электронной микроскопии: обычный чугун (а), наномодифицированный чугун (б)

## 1.2 Энергоэффективная конструкция анододержателя

Снизить контактное сопротивление в анододержателе можно путём использования ниппелей большего диаметра. Такие ниппели меньше поддаются деформации, оплавлению и коррозии. Они лучше отводят тепло от контактного узла, снижают его температуру и предотвращают окисление углерода в контакте «анод – чугун». По результатам математического моделирования разных диаметров анододержателя, снижение падения напряжения на участке штанга –

поверхность анода возле ниппеля составило 56 мВ. Для проведения эксперимента и сравнительного анализа, с опытными и серийными анододержателями на электролизере – свидетеле были установлены анододержатели с новыми ниппелями. Измерения потерь напряжения во всех анодах опытного электролизера и электролизера – свидетеля показали снижение напряжения в анодном массиве на 63 мВ. По сравнению с анододержателем РА–300 опытный анододержатель имеет меньшие теплотери, меньшую массу на 56 кг и меньшую высоту кронштейна на 140 мм при примерно одинаковом напряжении в аноде. Как видно из данных, приведенных на рисунке 9, энергоэффективная конструкция [5] анододержателя позволила дополнительно снизить напряжение электролизера на 0,2 В.

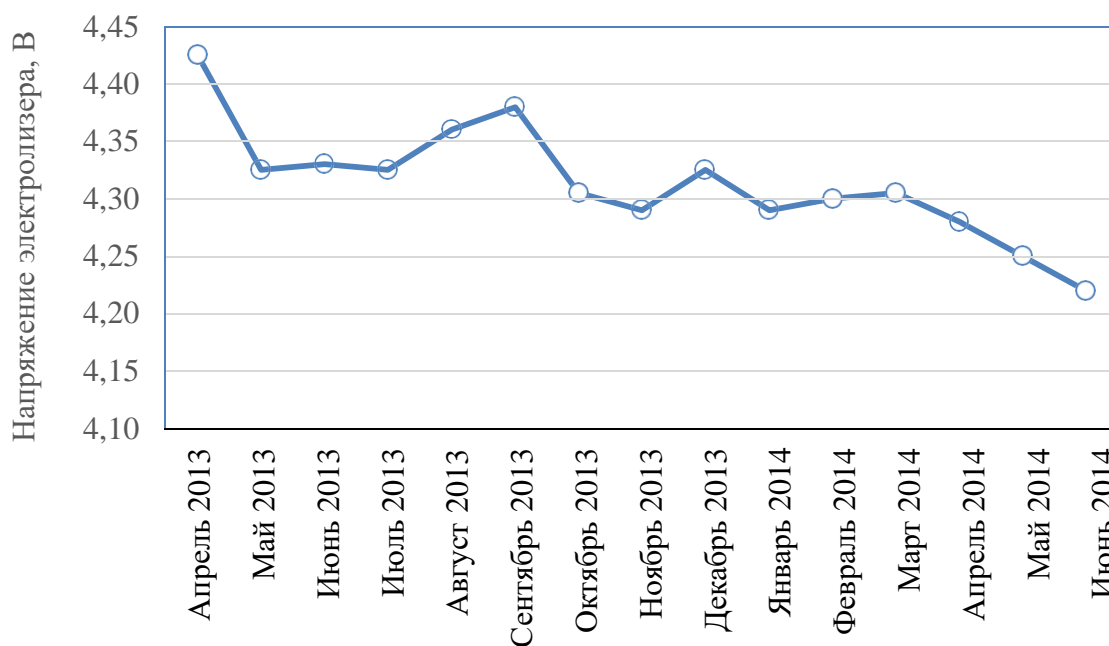
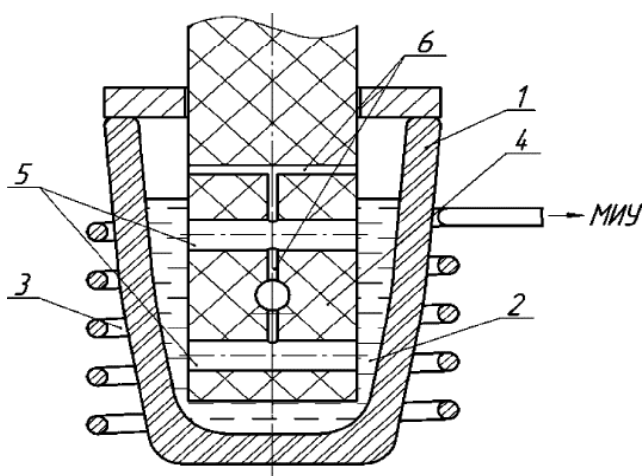


Рисунок 9 – Напряжение электролизера ОА–120 с опытными анододержателями

### 1.3 Повышение качества контактного соединения «угольный анод–шина»

Повышение качества контактного соединения «угольный анод-шина» достигается путем получением электроконтактных пробок в углеродном

материале, путем внешней (предварительной) подготовки отверстий и заливки их расплавом при одновременном воздействии на расплав импульсным магнитным полем [6]. Устройство для изготовления такого соединения, представленная на рисунке 10, работает следующим образом: при снижении заряда конденсаторов на индуктор, в его витках возникает, свободное проникающее импульсное магнитное поле (ИМП), которое в свою очередь оказывает силовое действие на расплав и вызывает принудительное заполнение им отверстий.



1 – тигель; 2 – расплав металла; 3 – индуктор; 4 – углеграфитовый материал; 5 – каналы для ЭКП; 6 – каналы для отвода воздуха

Рисунок 10 – Установка изготовления контактного соединения

Оценка снижения падения напряжения контактного соединения «углеродный материал – металл», полученного в лабораторных условиях под воздействием ИМП показала, что его сопротивление в 2–3 раза ниже переходного сопротивления контактного соединения, полученного традиционным способом – заливкой расплавленным чугуном. Причиной значительного снижения переходного сопротивления является основательность заполнения микропор в углеграфитовом блоке металлом, под воздействием импульсного магнитного поля.

## 1.4 Чугун для заливки анодов с оптимизированным составом без добавления фосфора

Применяемый на заводах чугун для заливки ниппельного гнезда обожженного анодного блока имеет химический состав близкий к оптимальному углеродному эквиваленту ( $CE=4,3\pm 0,1\%$ ), определяющий его хорошие литейные свойства.

В зависимости от содержания основных элементов, чугун может иметь избыточную усадку, что приводит к трещинообразованию в заливках при охлаждении, может иметь место и обратное – расширение сверх нормы, из за которого происходит разрушение анодов в конце выработки анодных блоков. Эти причины приводят к нарушению токораспределения и потере технологической энергии.

Расширение и усадка – это ключевые факторы повышения энергетической эффективности работы анода за счет обеспечения должного электрического контакта «стальной ниппель – обожженный анодный блок».

До 2015 г. на Российских заводах по производству алюминия, в заливочном чугуне использовалось высокое содержание фосфора в пределах 0,4–1,0 %, с 2016 г. содержание снижено и находится в диапазоне 0,2–0,6 %. По зарубежной практике содержание фосфора, как правило, не превышает 0,1%.

Решение актуальных задач по подбору оптимально состава чугуна с минимальным образованием усадочных раковин при охлаждении и минимальном расширении при разогреве, при условии дополнительного исключения добавки фосфора, определяет также актуальность оценки технологичности его приготовления и экономическую эффективность использования.

Углерод и кремний в чугунной заливке оказывает различное влияние на падение напряжения в обожженном анодном блоке. По данным ряда источников [7, 8] наиболее подходящее содержание углерода в чугуне, составляет от 3,4 до 3,6 %, содержание кремния не более 2,5 %. Эффект наличия кремния



заключается в увеличении объёма чугуна при застывании, что проявляется в более низкой усадке при охлаждении и переходе из жидкого состояния в твёрдое. Избыточное содержание фосфора повышает жидкотекучесть чугуна, что уменьшает зазор между стальным ниппелем кронштейна и угольным обожженным анодным блоком, тем самым обеспечивается снижение перепада напряжения. По данной причине чугун с высоким содержанием фосфора применяется на ряде зарубежных предприятиях. Например, на алюминиевых заводах Египта применяют заливочный чугун следующего химического состава, масс. %:

$$C - 3,0 \div 3,8; Si - 3,5 \div 3,8; Mn - 0,4 \div 0,8; P - 1,4 \div 1,6; S - < 0,05.$$

Так же известно негативное влияние фосфора на химические и физические свойства чугуна. Повышенное содержание фосфора в заливочном чугуне делает возможным его переход в расплав электролита, а из него – в алюминий – сырец. По данным зарубежных компаний более 50 % фосфора в электролите является результатом перехода из заливочного чугуна, но в текущих реалиях появление фосфора в электролите может происходить из-за оплавления ниппелей, при нарушении технологии. По причине технологических затруднений рафинирования фосфора из алюминия в миксерах, его содержание в заливочном чугуне должно быть минимально (не более 0,1 %). Так же фосфор увеличивает удельное электрическое сопротивление самого чугуна, и как следствие, ведет к потерям электроэнергии [9]. Марганец в чугуне, в свою очередь, способствует увеличению прочности на разрыв, и при содержании выше 0,8 % приводит к серьезным затруднениям работы прессов в анодно-монтажном отделении при снятии заливки. На практике в заливочном чугуне содержание марганца находится в диапазоне 0,4÷0,8 %.

Расчет содержания Mn, необходимого для нормальных прочностных свойств и связывания серы рассчитывается по формуле (1):

$$Mn = 1,7 S\% + 0,3. \tag{1}$$

Сера влияет в частности на прочность и низкотемпературное размягчение. Поэтому содержание серы, по данным зарубежных предприятий [10], не должно превышать 0,05 %. На практике поддерживать содержание серы на уровне менее 0,05 % выходит дорого и не эффективно, поэтому заводы используют чугун с содержанием серы не выше 0,20 %. Чугун поглощает серу из применяемых шихтовых материалов и материала угольного обожженного анодного блока, в результате на поверхности чугунной заливки формируется слой FeS, который приводит к увеличению электрического сопротивления на границе раздела «заливка – обожженный анодный блок – ниппель». Это подтверждается специальными исследованиями, проведенными в работе [11].

Углерод и кремний являются преобладающими элементами чугуна. Углерод оказывает большее влияние на жидкотекучесть, чем кремний, но также учитывается и влияние фосфора.

Закономерность, описывающая минимальную эвтектическую температуру плавления чугуна, описывается формулой (2), определяющей углеродный эквивалент CE:

$$CE = C \% + 0,3(Si \% + P \%). \quad (2)$$

CE = 4,3 % соответствует минимальной температуре перехода чугуна в жидкое состояние при температуре близкой к 1150 °С. Белый чугун CE = 4,1% и ниже; серый чугун CE = 4,1÷4,6 %; шаровидный чугун CE = 4,6 % и выше.

Для заливки ниппелей обожженных анодных блоков (для соединения со стальным кронштейном) общепринято используется серый чугун, удовлетворяющий требованиям технологии электролиза.

Согласно формуле (2), исключение фосфора при неизменном содержании углерода и кремния приводит к ухудшению литейных свойств, и как следствие происходит еще большая усадка чугуна после кристаллизации и остывания. При этом снижается эффективность работы индукционных тигельных печей и ухудшение взятия токовой нагрузки в начале цикла работы анода на электролизере. Соответственно, при такой прямой зависимости, исключение

добавки фосфора производится за счет изменения содержания кремния и углерода.

По данным статьи [12] в которой приводятся результаты анализа состава и структуры заливочного чугуна различных плавок на удельное электросопротивление авторами сделаны следующие выводы:

1. Алюминий повышает электросопротивление, укрупняет графит, несколько увеличивает количество феррита;
2. Введение бескремнистого сфероидизирующего модификатора (БКЛ) приводит к образованию вермикулярного графита, увеличению количества феррита и обеспечивает снижение электросопротивление;
3. Легирование медью повышает электросопротивление, причем тем сильнее, чем ниже содержание алюминия;
4. Получение шаровидного графита обеспечивает наиболее значительное снижение электросопротивление, но магниевые лигатуры не могут обеспечить необходимую «живучесть» в производственных условиях, а введение БКЛ позволяет получить преимущественно вермикулярную, а не шаровидную форму графита;
5. Повышение содержания кремния и марганца значительно повышает электросопротивление.

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что только подбор оптимального состава заливочного чугуна может значительно оказать влияние на снижение удельного электросопротивления в контакте «нипель-чугун-анод», а также положительно повлиять на физическое состояние отработанного огарка анода – снизить его растрескивание и разрушение [13].

На основании анализа влияния элементов заливочного чугуна на его свойства и проведения серии лабораторных сравнительных экспериментов (определялась усадка, расширение, электросопротивление, твердость, прочность и литейные свойства) в качестве оптимального состава серого чугуна принят опытный состав, представленный в таблице 1. Данный состав имеет углеродный эквивалент  $CE=4,3\%$ .

Таблица 1 – Содержание элементов в заливочном чугуна

Наименование		Содержание компонентов, %					СЕ, % Средний
		Si	C	Mn	P	S	
Завод № 1	допуск	2,5-3,5	2,9-3,5	0,2-0,6	0,1-0,3	мах 0,25	4,2
	факт	2,05	3,25	0,4	0,25	0,13-0,16	4,2
Завод № 2	допуск	2,4-3,2	3,0-3,8	0,55-0,75	0,2-0,4	мах 0,25	4,3
	факт	3,0	3,4	0,7	0,35	0,17	4,4
Завод № 3	допуск	2,5-3,5	3,0-3,6	0,4-0,8	0,1-0,3	мах 0,2	4,3
Экспериментальный состав	допуск	2,5-2,6	3,4-3,6	0,4-0,8	мах 0,1	мах 0,15	4,3
	факт на заводе № 2	2,58	3,57	0,61	0,11	0,096	4,4
Чугун литейный (ГОСТ 4832, группа 2, класс А, категория 3)	допуск	2,4-2,8	3,4-4,5	0,3-0,5	мах 0,08	мах 0,04	4,8

Испытания опытного состава проводилось на заводе 2, на котором используется до 20 % чугуна лома в виде секций газосборного колокола для обновления оборотного чугуна. На заводе имеется техническая возможность экспресс-оценки химического состава заливочного чугуна. Анодно-монтажное отделение оснащено современными индукционными тигельными печами, обеспечивающими хорошую гомогенизацию расплава.

В качестве чугуна для монтажа обожженных анодных блоков использован чугун с опытным химическим составом, для анодов свидетелей – рядовой заливочный чугун завода 2.

При визуальном анализе чугунной заливки замечено равное качество опытной заливки в сравнении с рядовой. Равное количество усадочных трещин (одна – две усадочные трещины на один обожженный анодный блок) указывает на равную усадку рядового чугуна и чугуна оптимального химического состава.

В первые сутки после замены, на каждой паре анодов измерялась токовая нагрузка, с периодичностью раз в два часа. Параллельно с этим, с интервалом пять суток, на каждой паре анодов был организован замер перепада напряжения в контакте «стальной ниппель – обожженный анодный блок» и замер токовой нагрузки. Результаты измерений представлены на рисунке 11.

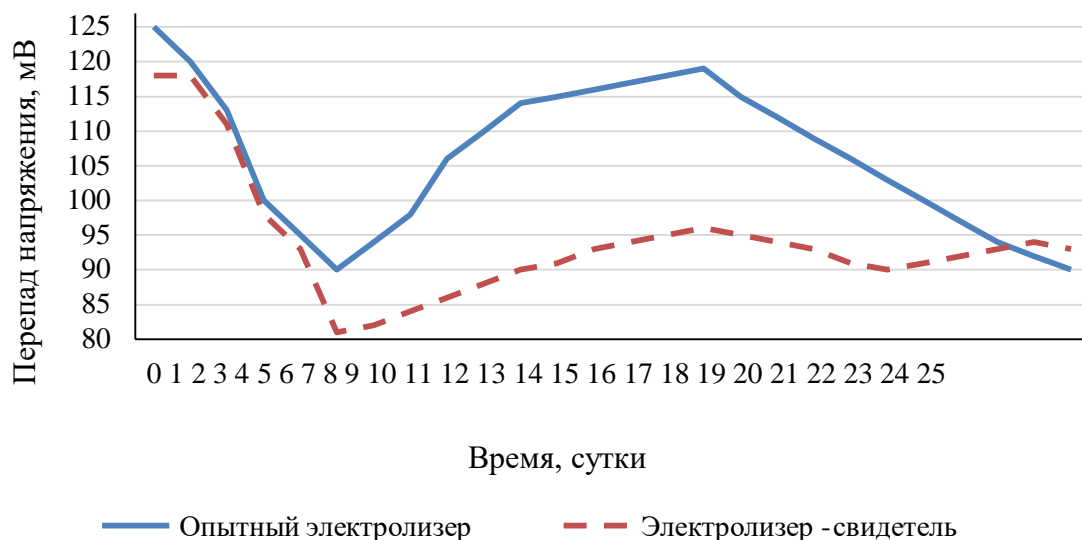


Рисунок 11 – Перепад напряжения в контакте «стальной ниппель – обожженный анодный блок» в течение цикла работы анодов

Для точности измерений перепада напряжения в данном узле применена методика с предварительным засверливанием анодов и установкой в тело анода, в районе каждого ниппеля, трех токоподводов, с присоединенными к ним высокотемпературными проводами. В качестве ответного контакта использовался высокотемпературный провод, присоединенный к предварительно приваренному болту в центральной части кронштейна, как показано на рисунке 12.



Рисунок 12 – Предварительное засверливание анодов и установка в тело анода трех токоподводов

Технология плавки и литейные свойства одинаковы для обоих видов чугуна. Внешне опытная заливка по качеству сравнима с рядовой и имеет одинаковую усадку. Это определено по наличию одинакового количества усадочных трещин не более 1–2 шт. на три ниппельных гнезда, что соответствует внутренним требованиям завода. В процессе испытаний не зафиксировано ни одного случая нарушения работы анода с опытным составом чугуна.

Значения токовой нагрузки и значение перепада напряжения в контакте «стальной ниппель – обожженный анодный блок» во время всей работы анодов приняты сопоставимыми для чугунов рядового и опытного химического состава, они находятся в пределах погрешности измерений. Средняя токовая нагрузка: 2,4 кА – опытный, 2,3 кА – свидетель. Средний перепад напряжения: 102 мВ – опытный, 91 мВ – свидетель. Расчетное среднее сопротивление контакта «ниппель–анод» 19 мкОм – опытный, 18 мкОм – свидетель.

Методика проведения замеров с предварительным засверливанием анодов и установкой в тело анода трех токоподводов [14], позволяет получить корректные и точные значения параметров и целесообразна к применению при сравнительных испытаниях подобного рода.

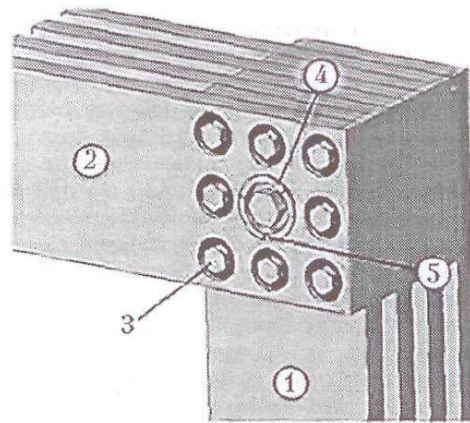
### **1.5 Замена в разъемных контактных соединениях болтовых стяжек на разрезные цилиндрические контактные вставки**

Значительная часть потерь электроэнергии происходит в контактных узлах электролизера. Одним из них является соединение «стояк – анодная шина». В реальных условиях эксплуатации Российских алюминиевых заводов, расположенных преимущественно в зонах с резким континентальным климатом, на величину этих потерь существенное влияние оказывают сезонные перепады температур. При перепадах температуры от  $-55$  до  $+40$  °С, происходит температурное расширение металла, в связи с чем наблюдается изменение сопротивления разъемных контактных соединений и рост падения напряжения в контактах алюминиевого электролизера до 20–25 мВ в летние периоды, до 5 мВ

зимой. С целью снижения этих потерь проводится систематическая проверка и обслуживание шинных соединений, требующая дополнительных материальных и временных затрат.

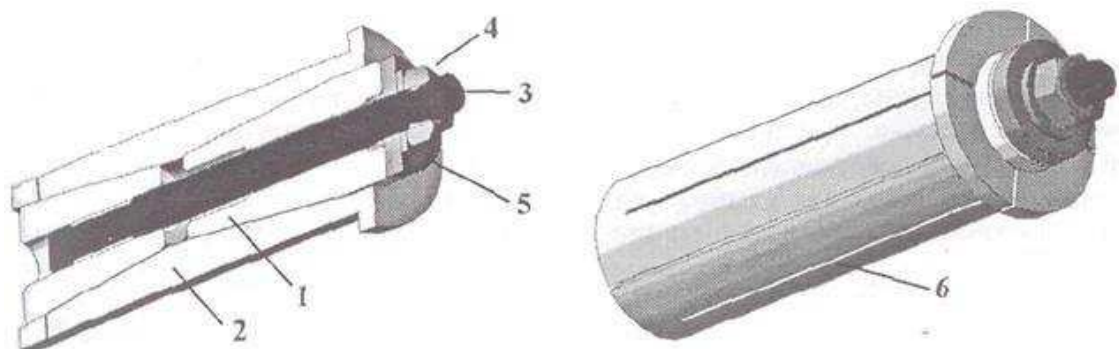
Используемые в болтовых соединениях алюминиевых шин, обычные шайбы и шайбы Беллевиля, также не обеспечивают надежного электрического контакта из-за разных линейных коэффициентов термического расширения, соединяемых между собой металлов. При снижении температуры, давление в контакте падает, при нагревании, соответственно, – растет, в свою очередь контактное сопротивление болтового соединения в 5–6 раз больше, чем сварное. При температуре окружающего воздуха от 8 до 15 °С контактное падение напряжения в болтовом соединении колеблется в пределах 15–31 мВ.

Замена в разъемных контактных соединениях болтовых стяжек, как показано на рисунке 13, на разрезные цилиндрические контактные вставки, на примере представленных на рисунке 14, обладающих более низким электрическим сопротивлением (меди или алюминия), позволяют нивелировать увеличение сопротивления. Для более качественного электро-контакта и понижения статического трения в разъемные цилиндрических контактных вставках так же применяются токопроводящие пасты, которое снижает падение напряжения более чем в 2 раза и обеспечивает стабильное падение напряжения в контактном узле в пределах 10–15 % от максимального значения [15]. Использование разъемных контактных соединений с разрезными цилиндрическими контактными вставками дает возможность не применять сварку швов в контактных группах ошиновки алюминиевого электролизера, увеличить пропускную способность, минимизировать воздействие температурных резонансов на потери напряжения.



1 – анодный стояк; 2 – анодная шина; 3 – стальной болт; 4 – разрезная вставка; 5 – разрез

Рисунок 13 – Разъемное контактное соединение с одной разрезной цилиндрической контактной вставкой



1 – распорная втулка; 2 – разрезная вставка; 3 – стальная шпилька;  
4 – гайка; 5 – шайба; 6 – разрез

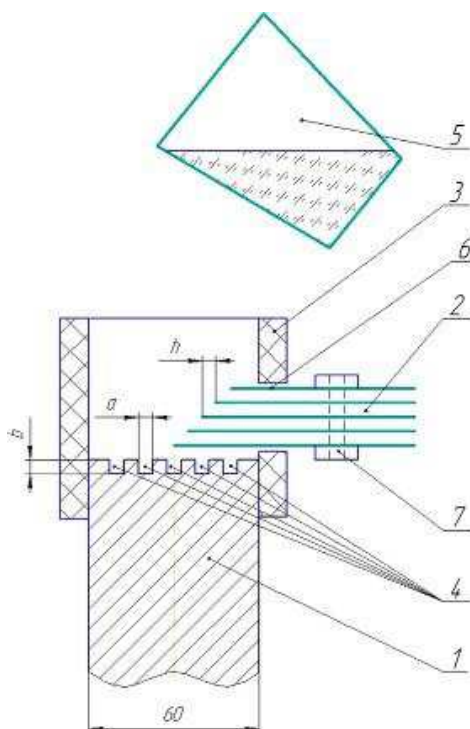
Рисунок 14 – Разрезная четырех-секционная вставка в сборе с двумя стальными распорными втулками

### 1.6 Уменьшение сопротивления в узле «гибкий катодный спуск – катодная шина»

Уменьшение сопротивления достигается за счет соединения методом заливки изложниц расплавом техническим алюминия, температурой 1200 °С, достаточной для разрушения оксидных пленок на поверхностях соединяемых деталей [16]. Схема получения соединений показана на рисунке 15. При этом увеличение теплового потока обеспечивается созданием искусственного



турбулентного режима обтекания свариваемых элементов, а именно: устройством на поверхности торца ошиновки поперечных канавок шириной и глубиной более 4 мм и укладкой в изложнице листов спусков в виде лестницы с напуском также более 4 мм [17].



1 – шина; 2 – спуск; 3 – изложница; 4 – фрезерованные канавки; 5 – ковш с жидким алюминием; 6 – прямоугольное отверстие; 7 – стальной зажим

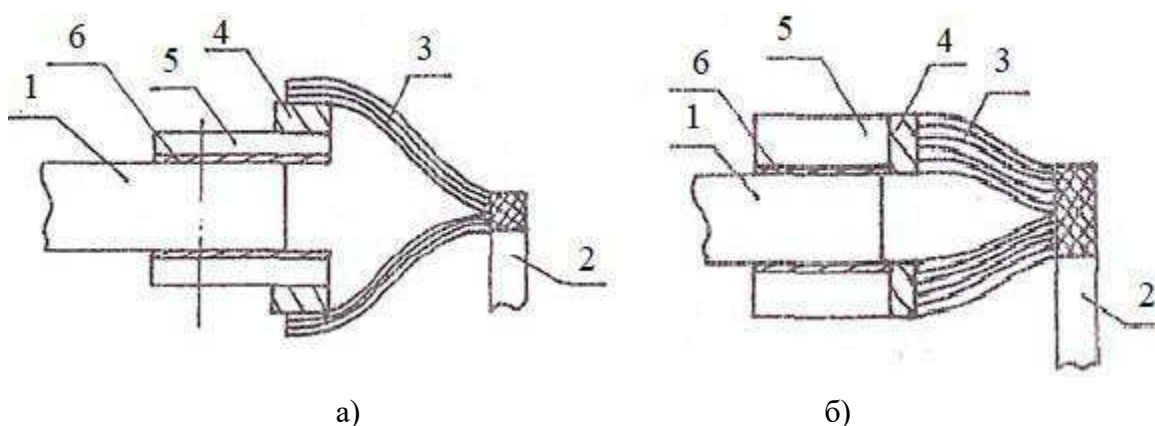
Рисунок 15 – Схема получения соединений катодного спуска с катодной шиной методом заливки перегретым расплавом

Электрические переходные контакты «алюминий–сталь», используемые для соединения сваркой катодного спуска с блюмсом, обеспечивают возможность эксплуатации при температурах от 200 до 500 °С. С течением времени такие тепловые нагрузки отрицательно сказываются на прочности переходных контактов и в долгосрочной перспективе приводят к их отказу. Повышение качества соединения «катодный спуск – блюмс» достигается путем применения переходника на основе композитного материала «медь – сталь – алюминий», по технологии сварки взрывом. В данном способе соединения, медный слой переходного элемента взаимодействует с поверхностью блюмса

катодной секции электролизера. К алюминиевому слою переходного элемента присоединяется токоведущая шина в виде набора гибких алюминиевых спусков, а прижимные поверхности болтового соединения соединяются со стальным слоем переходного элемента [18].

### 1.7 Переходники для соединения катодного спуска с блюмсом

Существенное повышение усилия стяжки достигается за счет стального болтового соединения. Для применения к конкретным типам электролизеров изготавливаются переходники, где в соединении «спуск – переходник» алюминиевый слой расположен как показано на рисунке 16, а на противоположных контактных поверхностях сторонах переходника.



1 – блюмс; 2 – шина; 3 – спуск; 4 – алюминиевый слой; 5 – сталь; 6 – медь

Рисунок 16 – Переходники «медь – сталь – алюминий» для соединения катодного спуска с блюмсом: на противоположных контактных поверхностях сторонах переходника (а); на перпендикулярных сторонах (б)

Вместе с этим применяют соединения разнородных токоведущих участков электрических цепей, которые так или иначе ведут к потерям электроэнергии в контактном узле. Основной причиной является большое значение переходного электросопротивления в контакте разных металлов, вследствие протекания электрохимической коррозии (при соединении «напрямую» медных и алюминиевых проводов, шин, аппаратных зажимов, соединений между

контактами и др.) [19]. Хорошо снизить потери электроэнергии в контактных узлах могут разнородные переходные материалы и узлы, выполненные из композитных, составляющих контактную пару, и имеющие значение ближе к нулю переходное электросопротивление, например, биметаллические медно-алюминиевые пластины; медно-алюминиевая колодка анодного узла электролизера алюминия; медно-алюминиевые токоподводы катодной секции электролизера алюминия. Преимуществом данных соединений является высокая надежность, прочность и долговечность, снижение потерь электроэнергии в 3–5 раз, экономия цветных металлов [20, 21].

### **1.8 Соединение кронштейна и алюминиевой штанги**

Эксплуатационные характеристики алюминиевого анододержателя определяются качеством сварного соединения сталь – алюминий, крепящего стальной кронштейн к алюминиевой штанге. Рабочая температура таких переходников не превышает 300 °С, а при кратковременном повышении температуры до 400–450 °С на границе алюминий – сталь появляется и растет слой интерметаллидов. Интерметаллиды могут образовываться даже при сварке взрывом, а толщина их слоя, составляющая около 10 мкм, более чем достаточна для разрушения соединения. Для повышения рабочей температуры данного соединения до 400 °С, вводят барьерную прослойку между алюминием и сталью из азотированного железа толщиной 1–2 мм. Однако обеспечить необходимое качество соединения сложно, вследствие необходимости оптимизации параметров при соединении алюминия и стали с подслоем сваркой взрывом. Хромовая барьерная прослойка толщиной от 2 до 200 мкм, наносимая совместной прокаткой со сталью, позволяет эксплуатировать переходник при температуре 400–500 °С, но эта твердая и хрупкая прослойка склонна к разрушению при динамических нагрузках.

Титановая прослойка толщиной 1–2 мм, прикрепляемая сваркой взрывом, может эксплуатироваться при температуре до 600 °С и ее в настоящее время

используют зарубежные заводы, эксплуатирующие электролизеры силой тока 300 кА и выше. В России используются переходники, выполненные с помощью механически неразъемного соединения конструкции «ласточкин хвост», срок службы которых при температуре 500 °С оценивается в 10–15 лет (при силе тока не более 300 кА). При этом высокое качество такого соединения достигается в более широком интервале взрывных параметров, чем для вставок с барьерным слоем. Стоимость соединения «ласточкин хвост» в несколько раз ниже, чем использование барьерных вставок [22].

Мирпочаев Х.А. в своей работе по усовершенствованию конструкции анодных токоподводов [23], предложил значительно увеличить контактную поверхность ниппель-анод. Идея заключается в формировании ниппельного гнезда на всю длину обожженного анода. Крепление анодного блока со стальным кронштейном анододержателя производится без заливки в ниппельные гнезда.

Таким образом увеличивается площадь контакта анододержателя с анодным блоком. По мнению автора статьи, внедрение принципиально новой конструкции анододержателя позволит улучшить характеристики работы анодного токоподвода, снизить потери напряжения. При этом происходит равномерное распределение тока по поверхности анодного блока и подине катодной части электролизёра. Конструкция превосходит типовые соединения анододержателя с угольным анодом по всем характеристикам, но затраты на изготовление, монтаж и демонтаж не перекрывают получаемый от этого эффект.

При рассмотрении патентных изобретений, было найдено альтернативное решение соединения анододержателя с угольным анодом без чугушной заливки [24]. Суть метода состоит в том, что анодное устройство сделано в виде закрепленной на алюминиевой штанге перекладины и металлических лент, которые крепятся с разных сторон к самому анодному блоку сверху, без использованию чугушной заливки. Ленты же выполнены в виде пакета из алюминиевой фольги со жгутами из стеклоткани, перекладина и штанга выполнена из технического алюминия. Угольный анодный блок на верхней поверхности имеет достаточный для крепления выступ, в котором выполнены

прямоугольные отверстия, в которые продеты пакет из алюминиевой фольги и жгуты из стеклоткани. На смонтирование анодного блока требуется всего пару минут, при этом не используется: стальная штанга, стальные ниппеля, заливка чугуна или забивка электропроводящей массой, сбивка сваренного со сталью чугуна и анодного огарка.

### **1.9 Медные вставки в блюмсы катодов**

Блюмсы выполняют функцию отвода тока от катода. Более равномерное распределение тока в блюмсах позволяет улучшить электропроводность токосъемников. Улучшение электропроводности достигается за счет использования стальных сплавов с низким удельным сопротивлением или просто путем введения медного сердечника в токосъемные стержни, что при равномерном токораспределении, позволяет уменьшить потери напряжения на 0,34–0,06 В, [25, 26]. Так же существуют способы, с самым оптимальным изменением конструкции блюмсов. Dupuis рекомендовал использовать медные блюмсы, позволяющие производить отвод тока на стороне выхода тока электролизера, упрощение системы ошиновки и использование существенно более широкого катода [27, 28]. Данные практики, в связи с увеличением единичной мощности алюминиевых электролизеров, приобретают все более пристальное внимание.

### **1.10 Энергосберегающие конструкции электролизеров**

В последнее время разрабатываются, испытываются и внедряются энергоэффективные технологии электролиза алюминия с использованием беззатратных, малозатратных и высокозатратных технических решений.

Беззатратные (200–300 кВт ч/т) технические решения:

- изменение конструкции футеровки,
- использование неформованных материалов цоколя,
- алгоритмы управления с низким межполюсным расстоянием,

- увеличение засыпки анодов,
- энергоэффективный послепусковой период.

Затратные (300–600 кВт ч/т) технические решения:

- сталемедные блюмсы,
- удлиненные аноды и 4-х ниппельный анододержатель,
- модернизация ошиновки,
- предварительный подогрев обожженного анода и сырья.

Высокозатратные (более 1000 кВт ч/т) технические решения:

- рекуперация тепла,
- новая ошиновка,
- новая энергоэффективная балка–коллектор.

Компания РУСАЛ непрерывно улучшает технологический процесс производства алюминия – сырья, и параллельно занимается модернизацией действующих мощностей. Электролизное производство компании насчитывает 26 типов электролизеров, отличные друг от друга как мощностью, так и конструктивом. 8 типов электролизеров уже прошли опытно – промышленные испытания, модернизированы, и тиражируются внутри компании. На 7 типах электролизеров отрабатываются лучшие производственные практики беззатратных технических решений. Модернизация 11 типов электролизеров сделана без изменения стоимости капитального ремонта. За время реализации программы по энергосберегающим конструкциям, модернизировано более 1500 электролизеров, которые экономят около 110 млн. кВт·ч электроэнергии в год. Лучший результат по расходу электроэнергии – 12770 кВт·ч/т алюминия – достигнут на электролизерах РА–300 при силе тока 314 кА. При внедрении беззатратных решений, было принято снизить межполюсное расстояние на электролизерах до максимально возможного минимума, для достижения высоких результатов выхода по току, снижения рабочего напряжения и расхода технологической электроэнергии. Само по себе снижение межполюсного

расстояния на энергоэффективных конструкциях алюминиевых ванн привело к обязательной необходимости разработки новых или изменению существующих алгоритмов управления электролизерами. В энергоэффективных конструкциях электролизеров используются неформованные материалы, рециклинг которых превышает 50 %, что позволяет снизить стоимость нижней части одного электролизера на 70–140 тыс. рублей. Испытания энергоэффективных электролизёров с цоколем из неформованных материалов становится актуальное не только с точки зрения снижения затрат на технологическую электроэнергию, но и снижение затрат на утилизацию и захоронение отработанной угольной футеровки.

После реализации в серийное производство опытно-промышленных конструкций электролизеров с беззатратными техническими решениями, работы по повышению энергоэффективности продолжаются с использованием затратных решений [29].

### **Выводы по разделу 1**

В данной главе решаются одновременно несколько взаимосвязанных задач: поузловой поиск потерь напряжения, способы их совершенствования, и изменение механических характеристик на протяжении всей работы электролизера.

1. Представлены способы соединения всех контактов алюминиевого электролизера.

2. На основе литературных данных проведен анализ потерь напряжения в контактных соединениях алюминиевого электролизера, определен «узкий», мало изученный контакт в анододержателе «алюминиевая штанга – стальной кронштейн».

3. Показано, что одна из основных причин увеличения энергопотерь в электролизере напрямую связана с потерями напряжения в контактных узлах.

[Изъято 42 страницы].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертация направлена на исследование и поиск технических решений повышения энергоэффективности алюминиевого производства и снижения энергопотребления электролизерами.

1. На основании литературных данных проведен поузловой поиск потерь напряжения, способы их совершенствования, и изменение механических характеристик на протяжении всей работы электролизера. Представлены способы соединения всех контактов алюминиевого электролизера, сделан вывод, что одна из основных причин увеличения энергопотерь в электролизере напрямую связана с потерями напряжения в контактных узлах;

2. Проанализированы причины потерь напряжения в контактных узлах алюминиевого электролизера, и выделены основные виды омических потерь. Представлены методики и порядок измерений потерь напряжения в контактных узлах, применяемых на предприятии

3. Рассмотрены конструкции крепления стального кронштейна к алюминиевой штанге биметаллическими пластинами: с вертикальным расположением – двумя пластинами, и с горизонтальным расположением – одной пластиной. На основании данных моделирования и анализа напряженного состояния биметаллических пластин установлено, что конструкция анододержателя с одной горизонтально расположенной биметаллической пластиной обеспечивает достаточную эксплуатационную прочность, а применение данной конструкции анододержателя позволит снизить затраты на биметаллические пластины.

4. С целью поиске путей снижения падения напряжения в контактных узлах алюминиевых электролизеров, для повышения их энергоэффективности в опытно-промышленном корпусе электролиза АО «РУСАЛ Саяногорск» были проведены работы по повышению надежности и снижению потерь электроэнергии в соединении «алюминиевая штанга – чугунный кронштейн». Для упрочнения соединения и снижения потерь напряжения в контакте



«алюминиевая штанга – чугунный кронштейн», на базе электролизеров РА–400 были рассмотрены и апробированы пять вариантов технических решений данного узла.

5. Замеры падения напряжения «штанга – кронштейн» и температуры в контактах проводились ежедневно в течении цикл работы анода. Падение напряжения через 27 суток в контакте «шина – кронштейн» тип 5 на 11–17 мВ ниже, чем в других, рассматриваемых типах контактов. Сравнение температуры в контакте «шина – кронштейн» показало, что тип № 5, имеет самую низкую температуру в конце цикла установки анода – 180 °С, что ниже на 25–27 °С типовых соединений. Техническое решение (комплексная двухсторонняя приварка штанги к биметаллической плите, тип № 5) включено в технологический пакет технологии РА–400 и РА–550.

6. На основе полученных результатов по надежности и энергоэффективности техническое решение по комплексному монтажу штанги к кронштейну по типу № 5 показывает экономическую привлекательность. Соединение более надежное и позволяет повысить энергоэффективность производства алюминия на технологии РА–400, РА–550. Проведенные расчеты экономической эффективности проекта показали, что проект характеризуется быстрой реализацией, не значительными вложениями, значимым экономическим эффектом и возможностью тиражирования на другие заводы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Троицкий, И. А. Металлургия алюминия : учеб. пособие для техникумов цветной металлургии / И. А. Троицкий, В. А. Железнов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1984. – 399 с.
2. Янко, Э. А. Производство алюминия : пособие для мастеров и рабочих цехов электролиза алюминиевых заводов / Э. А. Янко. – СПб : Изд-во С.Петербургского Университета, 2007. – 305 с.
3. Шахрай, С. Г. Энерго – и ресурсосбережение в производстве алюминия : монография / С. Г. Шахрай, В. В. Кондратьев, А. В. Белянин. – Красноярск : ИПК Сиб. федер. ун-та, 2014. – 6 с.
4. Лацинский, А. А., Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лацинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
5. Архипов, Г. В. Разработка и испытание электролизеров с энергоэффективными техническими решениями / Г. В. Архипов, В. Х. Манн, В. В. Пингин, Е. Р. Шайдулин // Сборник докладов VII Международного Конгресса Цветные металлы и минералы. – Красноярск, 2014. – С. 358–359.
6. Глущенко, В. А. Конструкции и технологии изготовления токоподводов электролизеров металлургического производства / В. А. Глущенко, Ф. В. Гречников, М. В. Хардин и [др.] // Сб. докладов IV межд. конгр. Цветные металлы. – Красноярск, 2012. – С. 509–514.
7. Nofal A. New solutions for stub-anode connection at Egyptalum / A. Nofal, M. Waly, Sh.Mohamed, M. Agour // Light Metals. – 2009. – PP. 1073–1078.
8. Trempe O. Étude expérimentale et modélisation du scellement d'un ensemble anodique d'une cuve Hall-Héroult / Master Thesis, Université, Quebec, Canada // 2011.
9. Янко, Э. А. Контроль качества обожженных анодных блоков для алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко, И. В. Черских, Е. А. Старцев // Металлург. – 2008. – № 11. – С. 31–34.

10. Bjarte O. Optimization Of the Anode-Stub Contact : Material Properties Of Cast Iron / Bjarte Oye, Anne Store, Elin Haugland, Jorund Hop // Light Metals. – 2010. – PP. 1073–1078.

11. Trempe O. Real Time Temperature Distribution During Sealing Process and Room Temperature Air Gap Measurements of a Hall-Heroult Cell Anode / Olivier Trempe, Daniel Larouche, Donald Ziegler, Michel Guillot // Light Metals. – 2011. – PP. 991–996.

12. Монтесино, Е. Р. Влияние состава и структуры на электросопротивление заливочного чугуна / Е. Р. Монтесино, Г. А. Косников // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием. – СПб, 2005. – С. 172–173.

13. Маковецкий, А. Н., Особенности и физические принципы влияния добавок кремния на свойства стали / Д. А. Мирзаев, А. А. Мирзоев, К. Ю. Окишев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Metallurgy. 2017. – № 4. – С. 38–48.

14. Mohamed M. Characterization of New Cast Iron Alloys for the Stub-AnodeConnection in the Aluminium Reduction Cells / M. Mohamed Ali [et al] // Journal of Engineering Research and Application, Volume 3, Issue 5, 2013. – PP. 414–419.

15. Галемов, Т. Т. Новый класс разъемных соединений ошиновки алюминиевого электролизера / Т. Т. Галемов, А. М. Петров, Ю. В. Васильев и [др.] // Сб. докладов XIII межд. конф. Алюминий Сибири. – Красноярск, 2007. – С. 53–57.

16. Галемов, Т. Т. Соединение алюминиевых деталей ошиновки электролизера «гибкий катодный спуск - катодная шина» / Т. Т. Галемов, В. И. Кирко, А. М. Петров // Сб. докладов IV межд. конгр. Цветные металлы. – Красноярск, 2012. – С. 526–531.

17. Пат. 2291916 Российская Федерация, МПК С25С3/16, В22D9/04. Способ соединения токоподводов электролизеров для получения алюминия / В. Х. Манн, Е. Н. Чичук, А. М. Петров и [др.] ; заявитель и патентообладатель

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технологический центр». – № 2005123454/02 ; заявл. 22.07.05 ; опубл. 20.01.07, Бюл. № 2.

18. Пат. 2535438 Российская Федерация, МПК С25С3/00. Электролитическое получение, регенерация или рафинирование металлов электролизом расплавов (С25С5/00 имеет преимущество) / Р. Х. Мухаметчин, М. А. Пак, В. В. Пингин ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр" (RU). – № 2013128836/02 ; заявл. 24.06.13 ; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34.

19. Богунов, А. З. О соединениях катодный спуск – блюмс / А. З. Богунов, А. А. Кузовников, В. В. Малышев // Сб. докладов IX межд. конф. Аллюминий Сибири. – Красноярск, 2003. – С. 214–216.

20. Готье, Д. Электрические контакты алюминий-сталь. Зависимость механических и электрических характеристик от температуры и времени / Д. Готье // Сб. докладов XIV межд. конф. Аллюминий Сибири. – Красноярск, 2008. – С. 70–77.

21. Feshchenko R. Yu. Effect of the Electrolyte Composition on the Losses of Fluorides under Various Temperature Conditions / V. Yu. Bazhin, A. A. Vlasov, D. D. Sharipov, R. Yu. Feshchenko // Russian Metallurgy (Metally), Volume 12, Issue 2, 2012. – P. 166–169.

22. Богунов, А. З. Сталеалюминиевые вставки нового типа: формирование соединения и оценка прочности / А. З. Богунов, А. А. Кузовников, В. В. Малышев и [др.] // Сб. докладов X межд. конф. Аллюминий Сибири. – Красноярск, 2004. – С. 156–160.

23. Мирпочаев Х. А. Усовершенствование конструкции анодных токоподводов смонтированных обожженных анодов электролизера для производства алюминия / Х. А. Мирпочаев, Б. С. Азизов, А. Ш. Муродиён. // ДАН Республики Таджикистан. – 2008. – Т. 51. № 10. – С 765–769.

24. Пат. 2405866 Российская Федерация, МПК С25С3/12, С25С3/16. Анодное устройство алюминиевого электролизера с обожженными анодами / В.

В. Леонов ; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (RU) ). – № 2009125887/02 ; заявл. 06.07.09; опубл. 10.12.10. Бюл. № 34.

25. Homley G.E., Ziegler D.P. Cathode collector bar. US Patent US 6231745 B1, 2001.

26. Von Kaenel R., Bugnion L., R. von Kaenel, G. Spinetti, M. Pfeffer The use of copper in cath-odes of aluminium reduction cells. Travaux 46, (2017), Proceedings of 35th International IC-SOBA Conference, Hamburg, Germany, 2–5 October, 2017, PP. 879–889.

27. Dupuis M. Low energy consumption cell designs involving copper inserts and an innovative busbar layout / M. Dupuis // Light Metals 2017, PP. 693–703.

28. Dupuis M. Very low energy consumption cell designs: the cell heat balance challenge. Light Metals. – 2018. – PP. 689–697.

29. Архипов, Г. В. Повышение энергоэффективности электролизеров РУСАЛ/ Г. В. Архипов, В. В. Пингин, Е. Р. Шайдулин, Р. Х. Мухаметчин, Ю. П. Зайков, О. Ю. Толмачева // Сборник докладов X Международного Конгресса Цветные металлы и минералы. – Красноярск, 2018. – С. 361–362.

30. Единая методика измерения падения напряжения на сварных и разъёмных контактных соединениях ошиновки электролизёров ОК «РУСАЛ». – Введ. 12.08.2016. – Саяногорск : ООО «РУСАЛ ИТЦ», 2019. – 59 с.

31. ГОСТ 17441–84 Соединения контактные электрические. Приёмка и методы испытаний. – Взамен ГОСТ 17441–78 ; Введ. 29.11.1984. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 20 с

32. КПВО 501.01.05.47–2018 Измерение электрического баланса электролизера. – Введ. 17.10.2018. – Саяногорск : АО «РУСАЛ Саяногорск», 2018. – 6 с.

33. КПВО 501.01.05.34–2020 Замер перепада напряжения в контакте шин-штанга. – Введ. 04.03.2020. – Саяногорск : АО «РУСАЛ Саяногорск», 2020. – 4 с.

34. КПВО 501.01.05.50–2019 Измерение падения напряжения в контакте блюмс-спуск. – Введ. 03.02.2019. – Саяногорск : АО «РУСАЛ Саяногорск», 2019. – 4 с.
35. КПВО 501.01.05.42–2018 Измерение токораспределения по анодам портативным измерителем тока. – Введ. 06.09.2018. – Саяногорск : АО «РУСАЛ Саяногорск», 2018. – 4 с.
36. КПВО 501.01.05.41-2019 Измерение падения напряжения в подине на электролизере. – Введ. 03.04.2019. – Саяногорск : АО «РУСАЛ Саяногорск», 2019. – 3 с.
37. Красовицкий, А. В. Увеличение площади обожженного анода – существенный потенциал для дальнейшего повышения производительности электролизеров ОАО «САЗ» / А. В. Красовицкий, А. А. Старцев // Техничко – экономический вестник «Русского алюминия». 2005. – № 10. – С. 29–31
38. Исаева, Л. А. Расчет электролизеров для производства первичного алюминия / Л. А. Исаева, Ю. Г. Михалев, П. В. Поляков // Уч. Пособие по курсовому и дипломному проектированию. – Красноярск : ИПК СФУ, 2010. – С. 100–112.
39. Николаев, А. Ю. Расчет цеха электролитического получения алюминия. / А. Ю. Николаев., А. В. Суздальцев. – Екатеринбург : Электронное текстовое издание Уральского Федерального Университета, 2007. – 20–30 с.
40. Борисоглебский, Ю. В. Металлургия алюминия : учеб. пособие по напр. "Металлургия" и спец. "Металлургия цветных металлов" / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин и [др.]. – Новосибирск : Наука, 1999. – 437 с.
41. K. Grjotheim, H. Kvande (Editors) "Introduction to Aluminium Electrolysis", 2nd Edition, Aluminium – Verlag, Dusseldorf. 1993 ISBN 3 – 87017 – 233–9.
42. Тихомиров, В. В. Прочностной анализ биметаллических пластин анододержателей алюминиевых электролизеров с обожженными анодами / В. В.

Тихомиров, С. Н. Ахмедов, Б. С. Громов, Р. В. Пак, В. А. Востриков, А. И. Огурцов // Цветные металлы. – 2006. – № 6. – С. 42–45.

43. Неймарк, Б. Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике : справочник / Б. Е. Неймарк. – М. : Энергия, 1967. – 240 с.

44. Фролов, К. В. Машиностроение : Энциклопедия / К. В. Фролов. – М. : Машиностроение, 2001. – 752 с.

45. Свердлин, В. А. Аноды алюминиевых электролизеров / В. А. Свердлин. – Москва : Metallurgy, 2002. – 314 с.

46. Jomar Thonstad, Cell Voltage. Anode Effect. 2000. NTNU. Trondheim. Norway. The 19th International course on process metallurgy of aluminium.

47. Patterson, E. C. Understanding the Effects of the Hydrogen Content of Anodes on Hydrogen Fluorides Emissions from Aluminium Cells/ E. C Patterson. M. M. Hyland, V. Kielland, B. J. Welch // Light Metals. – 2001. – PP. 365–370.

48. Панов, Е. Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е. Н. Панов, Г. Н. Васильченко, С. В. Даниленко и [др.] // Под общ. ред. Б. С. Громова. – М. : Изд. дом «Руда и металлы», 1998. – 256 с.

49. Янко, Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко. – М. : Руда и металлы, 2001. – 672 с.

50. Богунов А. З. Влияние термоциклического воздействия на прочностные свойства биметаллических сталеалюминиевых вставок / А. А. Кузовников, С. И. Фомин, Д. В. Киселев // Сб. докладов XIII межд. конф. Алюминий Сибири. – Красноярск, 2007. – С. 58–62.

51. Banker J. Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effect of Temperature and Time upon Mechanical Properties / J. Banker, A. Nobile // Light Metals. – 2002. – PP. 439–445.

52. Пузанов, И. И. Повышение надежности и снижение потерь электроэнергии в соединении «штанга – кронштейн» / И. И. Пузанов, А. В. Заводяк, Е. Я. Гиберт // Сборник докладов XI Международного Конгресса Цветные металлы и минералы. – Красноярск, 2019. – С. 254–261.


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  
« 07 » 07 2020 г.

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 Металлургия цветных металлов

«Повышение энергетической эффективности алюминиевых электролизеров  
путем снижения потерь напряжения в контактных узлах»

Руководитель

  
Подпись дата


канд. техн. наук, доцент  
Е.Д. Кравцова

Консультант по  
экономической  
части

  
Подпись дата

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

Магистрант

  
Подпись дата

Д.В. Калинин

Рецензент

  
Подпись дата

Менеджер проекта  
«Создание технологии РА-550»  
ООО «РУСАЛ ИТЦ»  
И.И. Пузанов

Красноярск 2020 год