

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

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Магистерская диссертация**

Увеличение срока службы кронштейнов анододержателей алюминиевых  
электролизёров

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель \_\_\_\_\_ д.х.н., профессор Н.В. Белоусова  
подпись, дата                          должность, ученая степень

Выпускник \_\_\_\_\_ Д.И. Тюменцев  
подпись, дата

Директор ДАМ  
Рецензент \_\_\_\_\_ ПАО «РУСАЛ Братск» филиал в г. Шелехов В.В. Патин  
подпись, дата                          должность, место работы

Консультант экономического \_\_\_\_\_ к.э.н., доцент Т.В. Твердохлебова  
раздела                                  подпись, дата                          должность, ученая степень

Красноярск 2020

## АННОТАЦИЯ

При производстве алюминия в электролизерах с обожженными анодами, с уменьшением высоты анодов появляется дефект кронштейнов анододержателей в виде колченогости и оплавления ниппелей. Данный виды дефектов приводит к дополнительным финансовым затратам на их устранения.

Целью данной работы является поиск путей повышения срока службы кронштейнов анододержателей алюминиевого электролизера и снизить количества ремонтов на устранения дефектов.

В данной работе изучены отечественные и зарубежные опыт производства стальных кронштейнов, а также их виды и назначения. Проанализированы проблемы появления дефектов при работе анода в алюминиевом электролизёре. Изменение конструкции кронштейна анододержателя, где были проведены ряд экспериментов. Рассчитан экономический эффект технологического решения.

КРОНШТЕЙН, АНОДОДЕРЖАТЕЛЬ, СОПРЕЖДАЮЩИЙ УГОЛ, АНОД, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР СОДЕРБЕРГА, ОБОЖЕННЫЙ АНОД, НИППЕЛЬ, ЭДЕКТРОЛИТ, ОГАРОК.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Аноды для производства алюминия.....	5
2. Виды электролизеров .....	7
2.1 Преимущества и недостатки электролизеров .....	8
3. Конструкция анододержателя .....	9
3.1 Различные виды конструкции анододержателей .....	13
4. Жизненный цикл анододержателя алюминиевого электролизера .....	38
5. Виды ремонтных работ с анододержателем алюминиевого электролизёра ...	46
6. Технические требования к анододержателям алюминиевого электролизера .	50
6.1 Основные технические требования .....	50
7. Анализ появления дефектов при работе анода в алюминиевом электролизере .....	51
8. Экспериментальный кронштейн сопреждающим углом крайних ниппелей ..	55
9. Экспериментальные кронштейны с защитным полимерным покрытием .....	58
10. Экономическая часть .....	58
Выводы .....	62
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	63
Приложение 1 .....	68
Приложение 2 .....	72

## **Введение**

На сегодняшний день алюминий является одним из основных конструктивных материалов. По объемам потребления алюминий занимает второе место, уступая лишь стали. Спрос продолжает расти высокими темпами. Алюминий применяется во многих отраслях промышленности (транспорт, строительство, энергетика, пищевая промышленность и др.). Для производства алюминия необходимо последовательное выполнение следующих операций и процессов:

- добыча бокситных руд;
- производство глинозёма из бокситных руд;
- производство анодов и анодной массы;
- производство фтористых солей (криолита, фторидов алюминия и натрия);
- электролиз алюминия;
- получение готовой продукции посредством литья.

В экономических условиях высокой волатильности на валютных, сырьевых и финансовых рынков, рентабельность алюминиевого производства колеблется в достаточно широком диапазоне. Инструментами компенсирования этого риска, являются оптимизация производственных процессов предприятия, сокращение издержек, автоматизация, система контроля качества продукции.

Практическая значимость магистерской диссертации заключается в получении реального и измеримого экономического эффекта, в применении технических решений на практике, изготовлении экспериментальных изделий в количестве 12 шт. и их учет, сборе и обработки данных с ремонтного участка анододержателей, составление план/факт модели эксплуатации анододержателей на предприятии, учет данных изделий, подтвержденных экспериментально, реальное увеличение срока службы анододержателя на 50%.

Целью данной выпускной квалификационной работы является поиск путей повышения срока службы кронштейнов анододержателей.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- изучить современную техническую литературу по теме исследования о кронштейнах анододержателей;
- проанализировать проблемы появления дефектов при работе анода в алюминиевом электролизёре;
- рассмотреть возможность изменения конструкции кронштейна анододержателя;
- провести поиск защитных покрытий материала;
- рассчитать эксплуатационную стоимость анододержателей, применяемых на производстве, так и экспериментального изделия;
- оценить экономический эффект технологического решения;
- внедрить изделие в производство.

## **1. Аноды для производства алюминия**

Производство алюминия осуществляется в электролизерах. Глинозем растворяется в расплавленном криолите приблизительно при 960°C [1]. Большой ток при малом напряжении постоянного тока проходит через аноды, которые погружены в электролит, затем – через слой расплавленного алюминия.

В настоящее время используется два вида анодов – обожженные аноды и аноды Содерберга [2]. Обожженные аноды производятся из смеси 50-65% нефтяного кокса, 14-17% каменноугольного пека (в качестве связующего) и 15-30% рециркулируемых анодных огарков. Из данной смеси формируются блоки, которые затем обжигаются в специализированных печах обжига анодов при температуре около 1100°C [3]. Так как углерод, из которого состоит анод, является одним из компонентов вступающим в реакции в процессе электролитического разложения глинозема и получения алюминия и расходуется с течением времени. В связи с этим обожженные аноды приходится

регулярно заменять, как правило, через 22-26 дней, когда они становятся в три-четыре раза меньше по размеру, чем были изначально. Остающиеся анодные огарки очищаются, разрушаются и используются в качестве сырья для производства новых анодов [4]. Электролизер с обожженными анодами в разрезе представлен на рисунке 1.

Аноды Содерберга – самообжигающиеся аноды непрерывного действия, что, в принципе, является преимуществом. Брикеты из анодной массы, состоящие из нефтяного кокса и каменноугольного пека (около 25 %), подаются с верхней части анода. По мере того, как анод расходуется у рабочей поверхности, анодная масса продвигается вниз по стальному кожуху и спекается при прохождении горячей части анода. Максимальная температура самообжига - от 950 до 980 °С [5].

Углеродные аноды предназначены для выполнения двух задач: обеспечение переноса электрического тока к электролизеру и для выполнения функций восстановителя при электрохимическом процессе, т.е. преобразовании глинозема в алюминий. Аноды представляют собой смесь твердого углеродистого материала (кокса) и связующего (пека).

К анодам предъявляются следующие требования:

- 1) высокая стойкость к окислению, позволяющая минимизировать избыточный расход анода;
- 2) высокая плотность и, как следствие, малое пенообразование;
- 3) высокая механическая прочность, обеспечивающая структурную целостность;
- 4) высокая чистота, исключающая загрязнение алюминия и уменьшающая расход анода;
- 5) высокое сопротивление термоудару.

Реакции, протекающие в электролизере, вносят вклад в расход анода. Реакции, которые не связаны с восстановлением алюминия, определяют избыточный расход анода, который не выгоден экономически и наносит вред окружающей среде [6].

## 2. Виды электролизеров

Существуют разные конструкции электролизеров, отличающиеся по мощностям. Рассмотрим три основных вида:

1-ый вид. Электролизеры низкой мощности ( $I < 100$  кА). Ванна, состоит из самообжигающихся анодов, ток подводится с торца, размещается в корпусе на одном этаже (рис. 1). Электролизеры низкой мощности практически полностью выведены из эксплуатации, доля ЭНМ в производстве алюминия Российской Федерации составляет не более 15%.

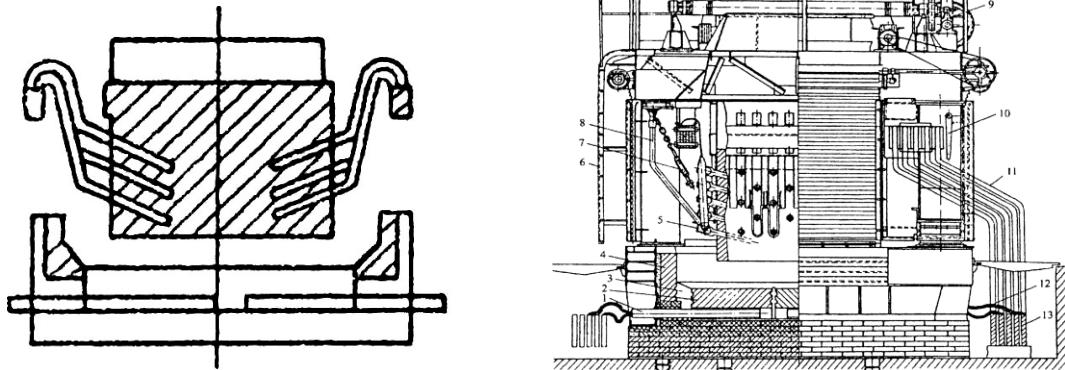


Рисунок 1 - электролизеры с боковым подводом тока

2-ой вид. Электролизеры средней мощности  $I=100-165$  кА. Электролизер, в котором присутствует один самообжигающийся анод, подвод тока исполняется сверху. в 70-е годы данный тип ванн осваивался в РФ. На его долю приходится в пределах 70% производственных мощностей алюминиевой индустрии РФ (рис. 2).

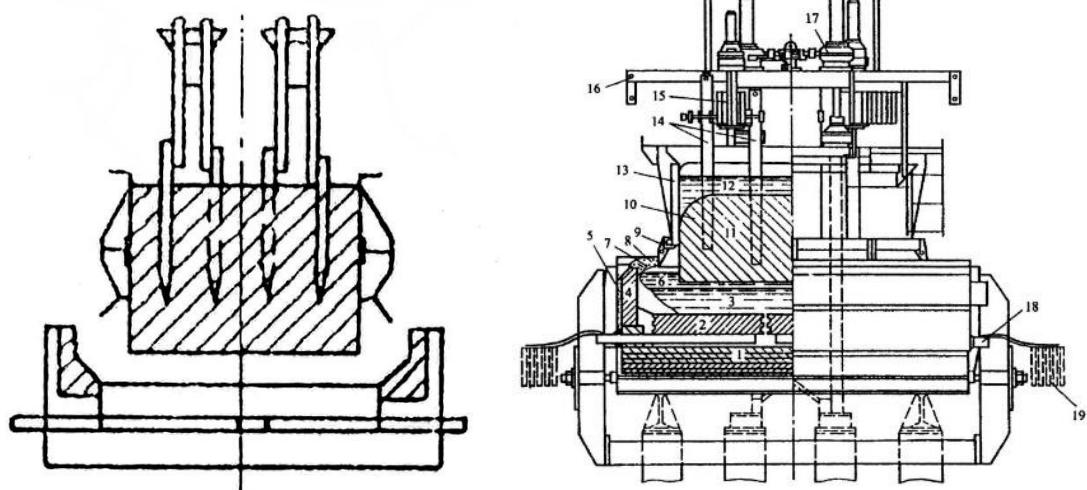


Рисунок 2 - Электролизер с самообжигающимся анодом с верхним подводом тока

3-ий вид. Электролизер большой мощности  $I=160\text{-}400$  кА, и выше. Электролизер состоит из предварительно обожженными анодами (рис. 3). Мощность этих электролизеров зависит от числа анодов в ванне. Эти ванны в корпусе располагаются так же на отметке + 4,0 м. Это электролизеры нашего времени, как раз с их начиналась история развития алюминиевого производства [7].

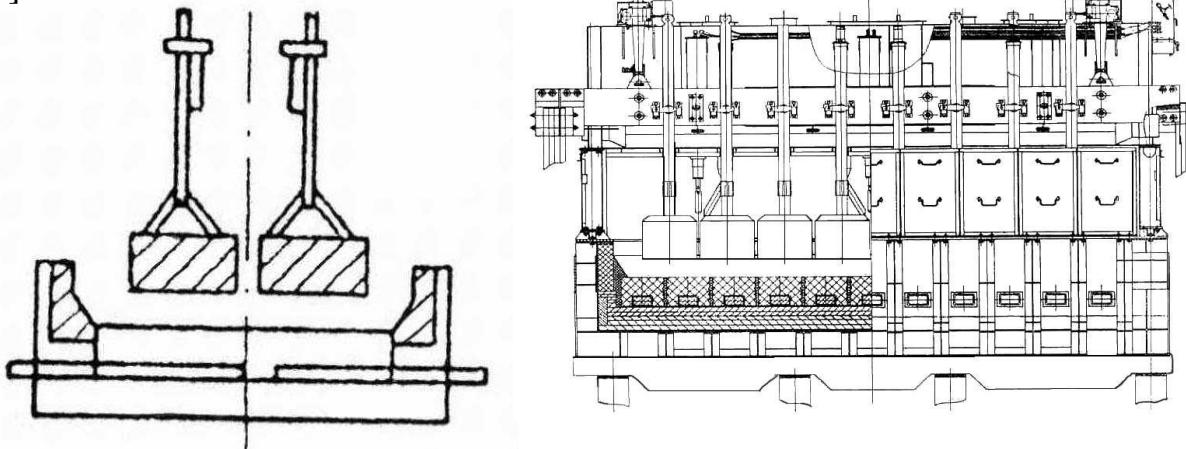


Рисунок 3 - Алюминиевый электролизер с предварительно обожженными анодами

## 2.1 Преимущества и недостатки электролизеров

Электролизеры низкой мощности оснащены самообжигающимися анодами, их системы довольно несложны. Для создания анода используется сравнительно дешевый материал – анодную массу. Преимуществом электролизеров низкой мощности является отсутствие отходов. Производство анодной массы имеет низкую себестоимость.

У самообжигающихся анодов существует ряд недостатков:

- ограничения, связанные с увеличением мощности ванн;
- нельзя применить способы механизации и автоматизации;
- из-за коррозии токоподводящих штырей и газосборных секций колоколов в электролит попадает Fe, что влияет на сортность металла;

- нельзя получить алюминий наивысшего качества, особенно на электролизерах ВТ;

- при производстве на данных тип ванн, выделяется большое количества углеводородов – газов и смол, которое уходит в атмосферу загрязняя окружающую срезу [8].

Преимущества электролизеров с обожжёнными анодами:

- мощность электролизера можно повысить с помощью увеличением количества анодов и расширением площади ванн;
- легко поддается изменений механизации, в том числе и автоматизации технологических процессов;
- при работе электролизера отсутствуют смолистые вещества, так как происходит сбор анодных газов;
- на этих тип ванн можно получить алюминий высших сортов, такие как марки А8.

При постройке новых заводов и при модернизация старых с 70-х годов, в корпусах отдают предпочтения мощным электролизерам с обожженными анодами. На сегодняшний день, устанавливают электролизёры  $I=275\text{-}350 \text{ кА}$ . На электролизёрах этого типа при анодной плотности тока  $0,85\text{-}0,88 \text{ A}/\text{см}^2$  показатель выхода по току составил - 95%, удельный расход электроэнергии  $\sim 13,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т Al}$ , расход анодов  $515/415 \text{ кг}$  (брутто/нетто).

При сгорании огарка его угольная часть, которой остаток на 2/3 по высоте, происходит замена анода вместе с анододержателем, так как он не является несущей частью конструкции электролизера в отличие от самообжигающихся анодов.

### **3. Конструкция анододержателя**

Анодный узел – сложный в конструктивном отношении элемент электролизера работающие в условиях высоких тепловых и электролитических нагрузок. Анод состоит из алюминиевой штанги, биметаллической прокладки, стального кронштейна, стального кронштейна с тремя или более ниппелями,

чугунной заливки и анодного блока как показано на рисунке, а также глинозёмной засыпки, не отображенное на данном рисунке 4.

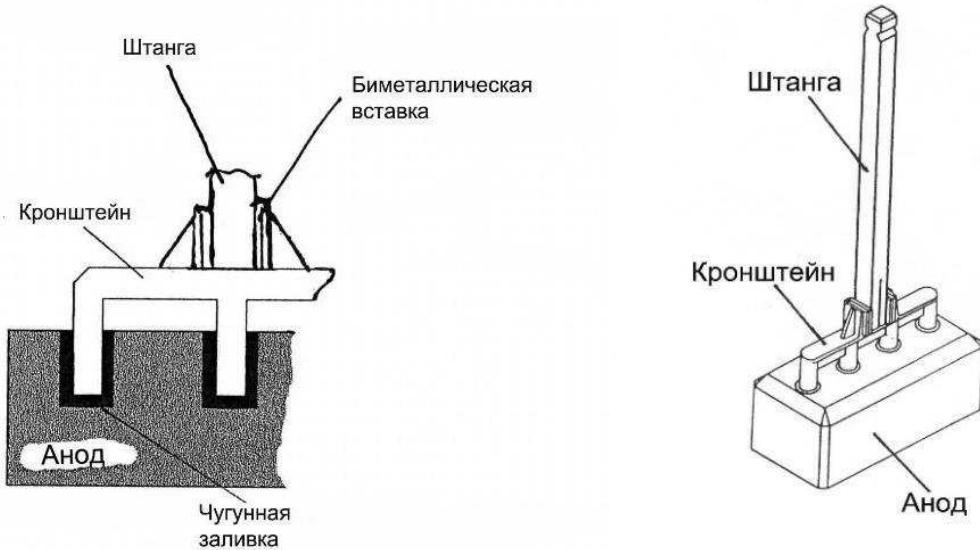


Рисунок 4 – Готовый анод для алюминиевого электролизера

Угольный блок имеет базовые размеры, мм: длина – 1450, ширина – 700, высота – 650, а также отверстия для ниппелей диаметром 160 мм. Три стольных ниппеля имеет диаметр: в чугунной заливке – 140 мм, на воздухе – 100 мм. Чугунная заливка используется для установления контакта между кронштейном и анодным блоком, а также фиксацией кронштейна и анодным блоком, алюминиевая штанга высотой 2000мм имеет в основании квадрат со стороной 140мм.

Металлический кронштейн с различным количеством ниппелей (токоотводов, погруженный в угольный анодный блок и соединённых с ним чугунной заливкой), так называемый стальной паук, предназначен для подвода тока к угольному анодному блоку, работающему в зоне непосредственного протекания процесса электролиза. Ток к аноду производится через алюминиевую штангу, соединенную со стальным пауком биметаллической прокладкой [9].

Кронштейн производится из стали, для того чтобы сохранить конструкционные свойства при эксплуатационных температурах. Штанга производится из алюминия, чтобы не допустить падения напряжения.

Конструкции анода и анододержателей могут быть разными, отдельно отмечу спаренные аноды с анододержателем типа «паук». Существуют аноды с расположением ниппелей в два ряда.

Кронштейн и штанга состоят из разных материалов. Для их соединения используется биметаллическая пластина, которая состоит из стали и алюминия для их соединения между собой используют сварку со взрывом. Между ними находится барьерный слой, который изготовлен из титановой фольги. Она служит для барьера химической реакции железа с алюминием. В результате которой, образуется прослойка интерметаллидов. Они дают резкий рост электрического сопротивления, деградируют механические свойства прочности контакта.

Конструкция биметаллической пластины собирается следующим образом: стальная пластина крепится к стальному кронштейну, а алюминиевая – соединяется с алюминиевой штангой. Такое соединение является качественное, для двух элементов этой конструкции [10].

С помощью чугунной заливки соединяется угольный анод и ниппеля анододержателя. К химии чугуна предъявляются особые требования: содержание углерода - 3,0–3,7%, кремния 2,0–3,6 % должно быть в допустимых пределах. Углеродный эквивалент СЕ, на производстве рассчитывают по формуле:

$$CE = C + 0,3 (Si + P). \quad (1)$$

Где, СЕ – углеродный эквивалент, %

C – содержание углерода, %

Si – содержание кремния, %

P – содержание фосфора, %

Чтобы понизить температуру плавления и изменить литейные свойства чугуна добавляют в расплав кремний и фосфор. Оптимальным значением считается СЕ = 4,3-4,6%.

Основные требования к заливочному чугуну:

- усадка должна быть минимальна;
- должен быть хрупким и легко демонтироваться с ниппеля;
- сопротивление в контакте железо-углерод должно быть минимальное.

Кристаллизационную усадку в чугуне создает сера, она образует рост сопротивления в контакте чугун-углерод, ее содержание не должно превышать 0,05%.

В таблице 1 приведены два химических состава литейного чугуна

Таблица 1 – Химический состав литейного чугуна

Содержание компонентов, масс. доля, %	Состав 1	Состав 2
C	3,0-4,0	3,3-3,8
Si	2,8-3,6	2,0-2,5
Mn	0,9 max	0,6-0,8
P	0,9-1,6	0,5-1,1

Исследованы физико-механические и литейные свойства высокофосфористых чугунов, применяемых при монтаже обожженных анодов алюминиевых электролизеров на предприятиях компании «РУСАЛ», в сравнении с серым чугуном, содержащим минимальные количества фосфора и серы. Показано, что первичная кристаллизация чугуна в условиях, приближенных к производственным параметрам заливки, и охлаждение чугуна в контактном узле «ниппель - чугунная заливка - угольный анод» протекает при значительном переохлаждении, что обусловливает образование в структуре чугуна перлитной матрицы с повышенной твердостью. Чугун с меньшим

углеродным эквивалентом, обладающий высокой твердостью, имеет более высокие значения модуля упругости и прочности [11]. Наличие тройной фосфидной эвтектики в структуре чугунов с высоким содержанием фосфора существенно снижает прочность на разрыв при высоких температурах эксплуатации анода, что может быть причиной разупрочнения чугунной заливки и схода анода с ниппелей в конце цикла работы, приводя к нарушению работы электролизера. Чугун с минимальным содержанием фосфора обладает прочностью, более чем в два раза превышающей прочность высокофосфористых чугунов, а также наименьшее электрическое сопротивление в области температур до 500-600 °С. Кроме того, чугуны с повышенным содержанием фосфора имеют аномально высокие изменения температурного коэффициента линейного расширения в области температур 600-810 °С, что также может приводить к разрушению «мягкого» огарка (анод в конце цикла работы) [9].

После отработки в электролизе, сгоревший анод или угольный остаток (огарок) демонтируется в анодно-монтажных отделениях. Отбракованные анододержатели (поврежденные штанги, ниппели, и д.р.), выводятся на ремонт, где происходит правка ниппелей от колченогости, правка алюминиевой штанги. Часть анододержателей с дефектом в области контакта по месту сварки биметаллических пластин отправляются в зону брака, на участок сварки. После чистки ниппелей анододержатель вновь применяется для монтажа следующего анода [12].

### 3.1

### **Различные виды конструкции анододержателей**

Анододержатель считается одной из важных частей конструкции анодного устройства, который удерживает анод в рабочем положении и дает подвод тока в электролизере от токоведущей ошиновки к угльному электроду (аноду). На сегодняшний день, существует множество видов анододержателей, существенно отличающихся по конструктиву. Во всех видах присутствуют три основных элемента (см. рисунок 5):

1. Токоведущая штанга;
2. Траверса (консоли);
3. Ниппеля.

Токоведущая штанга должна быть с высокой электропроводностью, должна изготавливаться из неферромагнитного материала 1 (см. рисунок 5) и быть с высокими механическими свойствами. Штанги изготавливаются из сплава алюминия и 5% кремния, т. е. силумин. Реже используется медь, это экономично, с точки зрения потерь напряжения в штанге, но медь в два раза дороже, чем у алюминия.

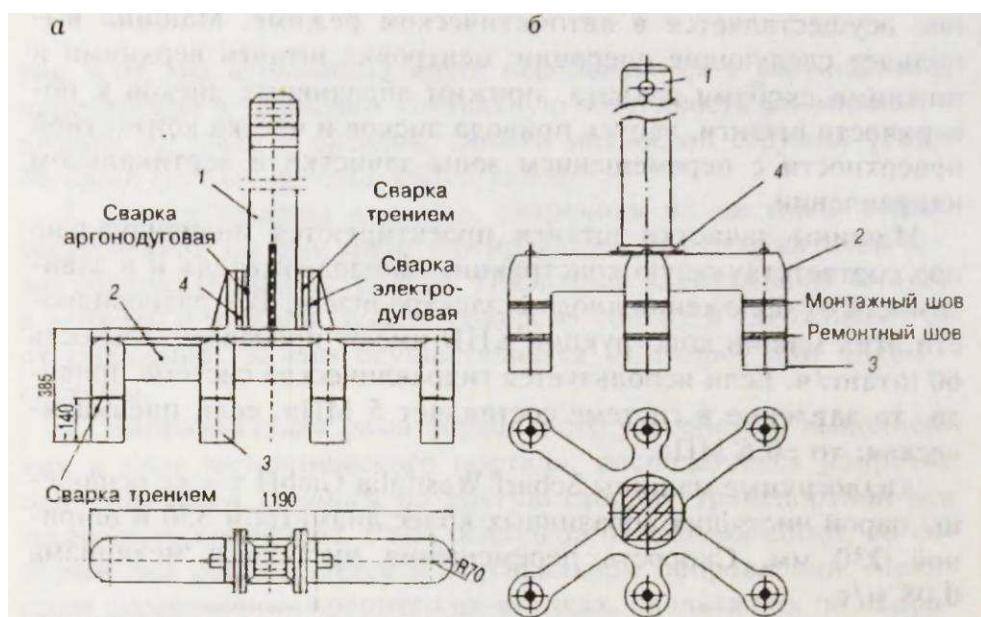


Рисунок 5 – Схематичное изображение анододержателей для обожженных анодов: а — ниппели расположены в один ряд; б — ниппели расположены в два ряда

На рисунке 6 представлена конструкция анода, где штанга, изготовлена из меди прямоугольного сечения. На некоторых предприятиях используют штанги, которые изготовлены из чистого алюминия марки А5, их минус в недостаточной механической прочности, они легко деформируются. Траверса 2 может быть изготовлена полностью литая или иметь сварную стальную конструкцию,держивающая анодные ниппеля и выполняяющая токоведущие функции. В верхней части, траверса, с помощью сварного контакта 4,

соединяется с токоведущей штангой. Траверсы бывают как симметричной и асимметричной формы, это зависит от конструкции электролизера в котором анододержатели используются.

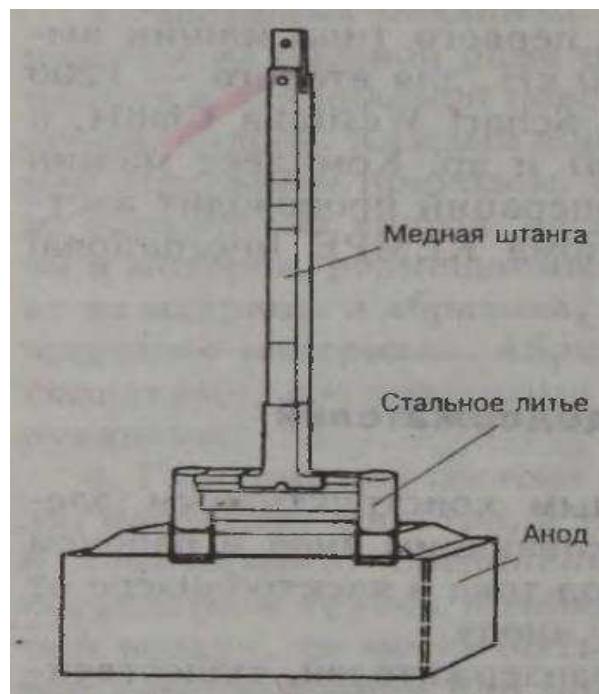


Рисунок 6 – анододержатель в сборе, с токоведущей штангой и траверсой из меди со стальным протектором ( завод Grande Baie, Канада)

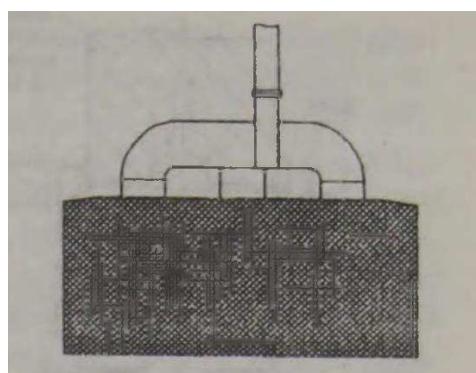


Рисунок 7 - Асимметричная трех ниппельная траверса (алюминиевый завод Dubai, ОАЭ)

На рисунке 7 представлена конструкция асимметричной траверсы для анода 1335x805x635 мм. Асимметрия использована из-за конструктивной особенности электролизеров. Ниппеля (см. рисунок 4) 3 крепятся к траверсе, с помощью сварки, и, через чугунную заливку, находятся в контакте с угольным анодом. В некоторых видах анододержателей ниппели являются продолжением

конструкции кронштейна и приваривается только нижняя бобышка ниппеля. Ниппельная часть может иметь форму прямоугольного бруска, привариваемого к кронштейну. Схема расположения ниппелей может быть однорядным, как на рисунке 1 $a$  и 3, или двухрядным, в виде паука, как на рисунке 1 $b$  и 4. Количество ниппелей может быть четыре или шесть штук, по три в каждом ряду. Один анододержатель может удерживать два анода на каждый ряд по аноду [13].

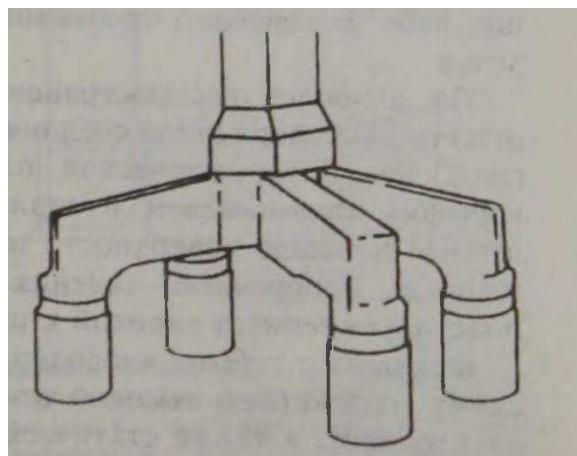


Рисунок 8 - Анододержатели с двухрядным расположением ниппелей

На рисунке 9 показано соединение алюминиевая штанга и кронштейн анододержателя алюминиевого электролизера. Где в данной конструкции, присутствует втулка, которая вставлена в кольцевую выборку. Соединение выполнено с ней посредством сварки-взрывом и втулка соединена со стальным кронштейном посредством сварного соединения по периметру втулки. Преимущество данного соединения в том, что оно надежно и долговечно.

Конструктивная часть анододержателя алюминиевого электролизера содержит в себе (см. рисунок 9) алюминиевую штангу 1, стальной кранштейн 2 и стальную втулку 3. В кольцевой выборке установлена стальная втулка 3, выполненной снаружи одного из концов алюминиевой штанги 1 и соединена с ней посредством сварки-взрывом. По периметру втулки 3 сварного соединения соединена стальная втулка 3 со стальной вилкой 2. При изготовлении анододержателя, стальная втулка 3 крепится к подготовленной алюминиевой штанге 1 посредством сварки-взрывом. Далее штанга 1, в сборе со втулкой 3,

приваривается непосредственно к стальной вилке 2. Данный вид кронштейна входит в состав трех-ниппельных анодов, где используется в качестве составного анода, в электролизёре марки РА-300.

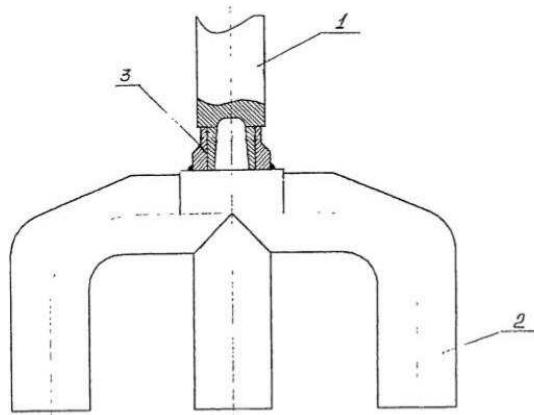


Рисунок 9 - Схематичное изображения анододержателя алюминиевого электролизера со стальной втулкой

Данная конструкционная модель позволяет повысить надежность и долговечность изделия, за счет повышения надежности соединения штанги с кронштейном, дает возможность отказаться от переходной пластины и, уйти от сварки алюминия [14].

Так же существует альтернативный кронштейн анододержателя, содержащий горизонтальную балку с соединенной к ней штангой и ниппели. В поперечном сечении горизонтальная балка имеет форму прямоугольника со скругленными радиально углами и радиально переходит в ниппель под углом 60° [15].

Наиболее близким к заявленной конструкции является кронштейн анододержателя, выполненный из стального литья или путем сварки отдельных элементов из стального проката и ветвей с круглым, прямоугольным или Т-образным сечением. Его ниппель приобретает форму в виде цилиндра с однорядным или двухрядным расположением. В отверстия углеродных анодов устанавливается кронштейн ниппелями и закрепляется. Биметаллический сталь-

алюминиевый переходник устанавливается на площадку его траверсы и обваривается сваркой по периметру прилегания [16].

Недостатком изделия является то, что в процессе работы электролизера, углеродная часть анодов укрывается сырьем от окисления до 80-100 мм. Кронштейн покрывается слоем сырья, местами до 50 мм. Кроме того, накопление пылевидной фракции сырья на элементах кронштейна происходит из-за работы автоматической системы подачи сырья. Глинозём является хорошим теплоизолятором, учитывая это, даже небольшое количество на кронштейне анододержателя ведет к снижению теплопередачи через его поверхность. По мере расхода углеродной части электрода (сгорания) из-за приближения к электролиту, температура кронштейна постепенно повышается. Из-за дополнительного утепления сырьем, происходит разогрев (перегрев) площадки, для крепления биметаллического переходника, до критичных, для сталь-алюминиевых биметаллических переходников, температур. Происходит снижение несущей способности на 50-70%. Аноды современных электролизеров обладают массой около 3 тонн, поэтому столь значительная потеря несущей способности ведет к разрушению биметаллического переходника, падению анода с кронштейном на подину электролизера и, как следствие, к нарушению технологии.

Цель предложенного изделия состоит в том, чтобы в процессе работы электролиза снизить температуру траверсы кронштейна, для недопущения разрушения биметаллического проводника.

Технический результат достигается тем, что в кронштейне анододержателя включает в себя:

- траверсу с площадкой для крепления биметаллического переходника;
- ветви;
- ниппели;

Кронштейн выполнена в форме усеченного конуса или усеченной пирамиды, и снабжен отверстием в центральной части. При этом углы оснований кронштейна и ветвей составляют не менее  $45^\circ$ .

В поперечном сечении могут быть изготовлены ветви в форме треугольника, трапеции или овала.

Чтобы снизить образование и накопление сырья на фронтальных поверхностях, необходимо изготовить кронштейн анододержателя в виде усеченного конуса или пирамиды, с углами при основании не менее  $45^\circ$ . Тем самым не допускается, за счет дополнительного утепления, повышение температуры траверсы. Сделанное отверстие в траверсе, под площадкой для соединения биметаллического переходника, ведет к уменьшению площади, передающей тепло биметаллическому переходнику путем прямого контакта, увеличивается поверхность теплоотдачи в форме трапеции или овала.

Если выполнить кронштейн в виде усеченного конуса или пирамиды, с углами основания не менее  $45^\circ$ , то это снизит образование и накопление сырья на их боковых поверхностях. Тем самым не допускает повышения температуры траверсы за счет утепления сырьем. Сделанное отверстие в траверсе, под площадкой для соединения биметаллического переходника, ведет к уменьшению площади, передающей тепло биметаллическому переходнику, путем прямого контакта, увеличивается поверхность теплоотдачи (охлаждения).

На рисунке 10 $a$  показан кронштейн на рисунке 10 $b$  - траверса в разрезе, на рисунках 10 $c$  и 10 $d$  - варианты выполнения сечения ветвей траверсы.

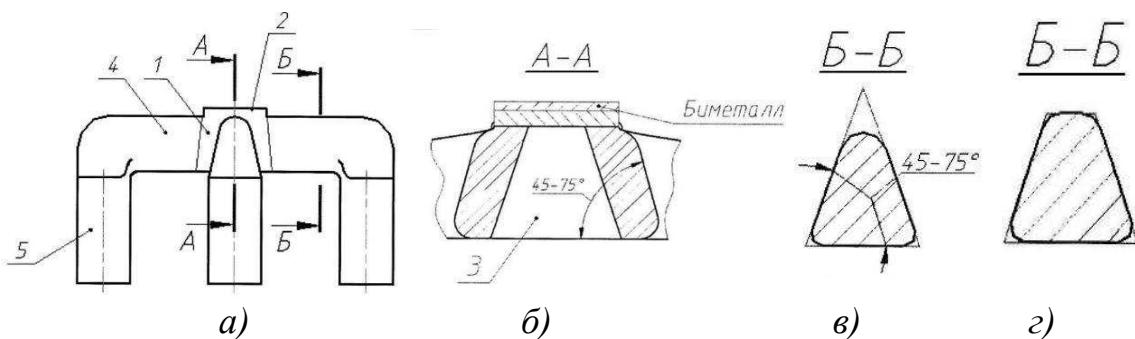


Рисунок 10 - Кронштейн анододержателя, содержащий траверсу, с площадкой для крепления биметаллического переходника

Кронштейн анододержателя состоит из траверсы 1, в виде усеченного конуса или усеченной пирамиды, в верхней части которой выполнена площадка 2 под биметалл с отверстием 3 в средней части, ветвей 4 и ниппелей 5.

Кронштейн анододержателя может быть изготовлен с помощью сварки отдельных элементов, так и цельнолитым. Кронштейн 1 выполненный в форме усеченного конуса или пирамиды с углами в основании не менее  $45^\circ$ . В средней части площадки под биметалл 2, траверса 1 снабжена отверстием 3, которое может быть выполнено как механически, так и при литье. Ветви 4 кронштейна анододержателя выполняются в сечении треугольной формы, в форме трапеции или в форме овала, с углами в основании не менее  $45^\circ$ .

При выполнении вершин углов сечения ветвей с радиусом, а боковых поверхностей криволинейными, сопряженными с радиусами вершин углов (литой вариант), сечение приобретает форму овала. При сварном варианте ветви 4 привариваются к траверсе, при литом варианте - отливаются совместно с траверсой. Ниппели, имеющие цилиндрическую форму, изготовлены заодно с ветвями - литой вариант, могут быть и приваренными к ветвям - сварной вариант [17].

Изготовления кронштейна в виде усеченного конуса или усеченной пирамиды с углами в основании не менее  $45^\circ$  и поперечного сечения ветвей с углами при основаниях не менее  $45^\circ$  ведет к тому, что сырье будет осыпаться. Каждый сыпучий материал имеет предельные значения угла естественного откоса. Глинозем является основным сырьем для получения алюминия и, в зависимости, от состояния (влажность, фракционный состав, примеси) его угол изменяется в широком диапазоне. Изготовление поперечного сечения ветвей с углами в основании менее  $45^\circ$  ведет к увеличению их размеров в горизонтальной плоскости, повышает возможность накопления сырья на их поверхностях. Отверстие в траверсе увеличивает поверхность охлаждения траверсы и уменьшает площадь прямого контакта с биметаллическим переходником.

В процессе работы электролизера углеродный анод укрывается сырьем, это делается для того, чтобы снизить окисления и не потерять тепло. Сырье,

попадая на кронштейн анододержателя, осыпается с его элементов - не происходит его накопления. При выполнении отверстия в центральной части траверсы, уменьшается площадь прямого контакта с биметаллическим переходником, снижается до 5% масса траверсы. Снижение дополнительного нагрева из-за накопления сырья, увеличение поверхности охлаждения траверсы и уменьшение площади прямого контакта снижает температуру в биметаллическом переходнике. Предотвращает разрушение кронштейна и нарушение технологии электролиза.

Данные кронштейны анододержателей проходят испытания на действующих электролизерах высокой мощности.

Известно несколько видов, различающихся по конструкции, анододержателей, общим правилом которых является наличие трех последовательно-соединенных конструктивных элементов: токоведущей штанги, стального кронштейна (траверсы, консоли) и стальных ниппелей, которые посредством чугунной заливки обеспечивают контакт с угольным (нефтяной кокс, связанный пеком) анодом. Недостатки конструкции, обусловленные необходимостью соединения четырех разнородных материалов с различными показателями электрической проводимости и механической прочности - силумина, стали, чугуна и угольного анода, очевидны: наличие большого количества переходных зон контакта, неравномерное токораспределение, значительный и постепенно увеличивающийся, в процессе эксплуатации, перепад напряжения в переходных зонах "штанга - кронштейн - ниппель - заливка - анод", деградация механической прочности, дорогостоящие технологии производства и соединения конструктивных элементов, трудоемкие, непроизводительные и экологически "грязные" операции по чугунной заливке и реставрации ниппелей, проблемы при транспортировке анододержателя, в сборе с анодом, и, как следствие, посредственные технические характеристики - относительно короткий срок эксплуатации анододержателя и анодного токоподвода в целом, повышенный расход электроэнергии и нестабильная работа электролизера. В качестве прототипа (см. рисунок 11) к заявленному

изобретению, выбран анододержатель анодного токоподвода электролизера для производства алюминия, состоящий из силуминовой штанги, биметаллической сталеалюминевой вставки и литого стального кронштейна. Отсутствие традиционных ниппелей и выполнение ниппельной части кронштейна в виде бруса трапециевидного сечения значительно улучшило технологические и технические характеристики процесса электролиза, что подтвердили проведенные на Государственном унитарном предприятии "Таджикская алюминиевая компания" (ГУП "ТАлКо") опытно-промышленные испытания. В то же время, в данной конструкции присутствует наиболее критический узел анододержателя - соединение силуминовой штанги со стальным кронштейном. Уязвимость соединения связана с циклическими воздействиями высокой температуры, агрессивной среды, механическими нагрузками, диффузионным образованием хрупкой прослойки интерметаллидов и проявляется в снижении электропроводности и механической прочности анододержателя. Анализ источников информации показывает, что все предлагаемые технические решения (клиновые и болтовые соединения, применение биметаллических вставок, сварка трением, оплавление и т.д.) направлены не на радикальное устранение проблем в рассматриваемом узле, а лишь на частичное улучшение характеристик соединения, не оправданное с точки зрения технологии и экономичности. Целью изобретения является улучшение технических и эксплуатационных параметров анододержателя, за счет снижения падений напряжения и увеличения механической прочности. Поставленная цель достигается выполнением анододержателя в виде цельнолитой конструкции из алюминиево-циркониевого сплава. Предлагаемые конструкция и материал обеспечивают хороший баланс механической прочности, электропроводности и экономичности; отсутствие в конструкции анододержателя соединений (сопряжений) и значительное сокращение переходных зон контакта (до двух) в целом по анодному токоподводу,

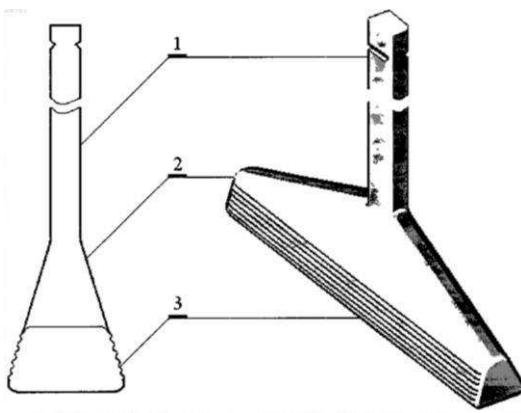


Рисунок 11 - Анододержатель цельнолитой

способствует равномерному токораспределению в анодном блоке, снижению перепадов напряжения и стабильно высокой механической прочности, повышению технологичности и снижению трудоемкости при изготовлении, а также удобству при обслуживании и внутризаводских перемещениях.

На рисунке 11 представлен цельнолитой анододержатель электролизера для производства алюминия, предназначенный для подвода положительного заряда от токоведущей ошиновки и удержания анода в рабочем положении, включает два элемента: штангу 1 и кронштейн 2. Ниппельная часть кронштейна изготовлена в виде усеченного обратного клина трапециевидного сечения, но в отличие от прототипа имеет закругления на вершинах и ребрах, что облегчает операциистыковки с анодным блоком и минимизирует механические напряжения в зонах соединения "ниппельная часть кронштейна - анодный блок". Боковые грани кронштейна анододержателя имеют горизонтальное волнообразное рифление 3. Анододержатель с рифлеными гранями хорошо моделируется в соразмерном пазе разогретой полуаморфной массы анодного блока, что увеличивает площадь контакта и, соответственно, улучшает электромеханические параметры работы анодного токоподвода. Применение предложенного анододержателя, ввиду идентичности его конструкции и типоразмеров традиционному, возможно в действующих электролизерах без изменения их конструктивных элементов [18].

Наиболее критическим элементом в конструкции анододержателя является соединение алюминиевой штанги со стальным кронштейном. Как известно, эти металлы не удается соединить обычными методами сварки. Одни из первых типов отечественных анододержателей по конструктивному исполнению были разъемными: контакт токопроводящей алюминиевой штанги со стальным кронштейном осуществлялся посредством клинового или болтового соединения (рисунок 12). В результате ослабления контактного соединения у такого типа анододержателей, происходит падения напряжения в переходных контактах от 35-40 до 150-200 мВ.

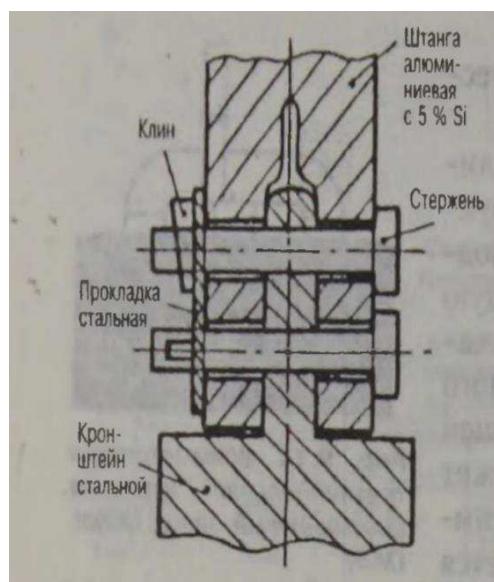


Рисунок 12 - Разъемное соединение анододержателя с клиновым зажимом

Периодическая переборка и зачистка контактных поверхностей штанги и кронштейна способствуют их механическому износу и связана с большими затратами ручного труда. Чтобы исключить недостатки анододержателей разъемного типа в последующем, была разработка неразъемной конструкции. По конструкции и технологии изготовления неразъемные анододержатели производятся либо с использованием так называемых биметаллических вставок, либо прямым соединением сталь-алюминий сваркой трением или оплавлением. Иные способы получения сталь-алюминиевых соединений: литое плакирование,

пакетная сварка прокаткой, авто-вакуумная сварка, электродуговая наплавка — либо дорогостоящи, либо не отвечают требованиям эксплуатации анододержателей.

Наиболее распространенной технологии алюминиевая штанга анододержателя соединяется со стальной тяверсой посредством биметаллической пластины, полученной сваркой взрывом" алюминиевой и стальной пластин. Обращенная к штанге площадь поверхности пластины равна или превышает площадь поперечного сечения штанги. евая часть  
~~Алюминий~~ крепится сваркой к штанге, стальная - к траверсе.

В жизненном цикле, на анододержатели воздействует высокая температура и агрессивная среда электролиза, а также подвергаются статическим и динамическим нагрузкам при монтаже, демонтаже и транспортировке. Наиболее уязвимое место — это сталь-алюминиевый контакт. Поэтому срок эксплуатации анододержателей с применением биметалла определяется сроком службы сталь-алюминиевого контакта. В процессе работы анода в электролизере в результате длительного воздействия высоких температур (до 500 °C) в соединении алюминий-сталь происходит взаимная диффузия алюминия и железа, которая, протекая в твердом состоянии, образует в контакте алюминий-железо хрупкую прослойку интерметаллидов FeAl<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>. В результате их образования увеличивается электрическое сопротивление контакта и снижается его механическая прочность. Поэтому при разработке конструкции анододержателя, сталь-алюминиевый контакт между штангой и кронштейном необходимо располагать таким образом, чтобы его температура, в течение последних суток работы анода в электролизере, не превышала 500 °C.

На рисунке 13 изображены несколько видов неразъемного соединения штанга-кронштейн, с использованием биметаллических пластин, а также прямой сварки сталь-алюминий. На рисунке 3а, анододержатель изготовленный сваркой трением. Вначале, изготавливается переходная вставка сваркой-трением стальной бобышки 2 с алюминиевой вставкой. Бобышка имеет в контактном

торце расширяющееся к основанию отверстие. В процессе сварки, отверстие заполняется алюминием, образуя, кроме сварки, дополнительную механическую связь. Переходная вставка соединяется алюминиевой частью со штангой сваркой трением, а стальная бобышка соединяется с кронштейном электродуговой сваркой.

Средний ресурс службы до капитального ремонта составляет, для соединения, 0,8 года, полный срок службы 2 года, количество сварных соединений 3. Анододержатель, изготовленный сваркой оплавлением, представлен на рис. 13б. Конструкция состоит из алюминиевой штанги, переходного пакета гибких пластин в защитном корпусе, стальной бобышки и траверсы. Вначале, пакет алюминиевых пластин сваривается со стальной бобышкой на стыковочной машине. Затем, пакет алюминиевых листов с другой стороны сваривается дуговой сваркой в атмосфере инертного газа (аргона) с алюминиевой штангой. После этого, бобышка приваривается к кронштейну электродуговой сваркой. Эта конструкция имеет высокую устойчивость к воздействию динамических и статических нагрузок, так как защищена стальными пластинами 6 с торцевых сторон. Имеет те же показатели надежности, что и предыдущая конструкция. Анододержатель, изготовленный с использованием сталь-алюминиевых пластин, представлен на рисунке 13в. Биметаллическая вставка 7 в этой конструкции расположена горизонтально. Штанга приваривается к алюминиевой части биметаллической пластины аргонодуговой сваркой, а траверса к стальной части пластины — обычной электродуговой сваркой. Соединение штанги с алюминиевой пластиной можно осуществить также с помощью сварки-трением. Это обеспечивает большую прочность сварного контакта, а также надежное взаимодействие между двумя поверхностями по всей площади поперечного сечения штанги. Если биметаллическая вставка изготовлена сваркой-взрывом, с закладкой в зоне контакта «барьерного слоя», препятствующего образованию интерметаллидов до температуры 500 °C, эту вставку можно устанавливать непосредственно на верхней части траверсы. Показатели надежности такого соединения: средний

ресурс до капремонта 1 год, средний срок службы 3 года, количество сварных переходных соединений 3. Анододержатель, изготовленный с использованием двух биметаллических пластин, установленных вертикально, приведен на рисунке 13 $\varepsilon$ , 13 $a$ . Он состоит из алюминиевой штанги, стальной траверсы с двумя стойками — приливами, образующими паз, в котором размещается штанга и по обе стороны от нее — две биметаллические вставки, изготовленные сваркой-взрывом. Штанга соединяется дуговой сваркой в среде аргона с алюминиевой частью вставок, а стоики стального кронштейна — обычной электродуговой сваркой со стальной частью вставок. Показатели надежности и долговечности заметно выше, чем в предыдущей конструкции [19].

Анододержатель, изготовленный с применением сварки-трением встык, представлен на рисунке 13 $d$ . Штанга соединяется со стальной бобышкой сваркой трением. Затем бобышка соединяется со стальной траверсой электродуговой сваркой. Такой анододержатель удобен в эксплуатации, имеет простую конструкцию и прост в изготовлении, обладает стойкостью к действию статических нагрузок. Однако, при воздействии динамических нагрузок сталь-алюминиевый контакт, из-за относительно быстрого старения, имеет склонность к хрупкому разрушению.

Анододержатель, изготовленный с применением трех биметаллических вставок, представлен на рисунке 13 $e$ . Соединение состоит из алюминиевой штанги, двух вертикально и одной горизонтально расположенных биметаллических вставок. Штанга соединяется посредством штифта с двумя вертикальными вставками, которые стальной частью привариваются к траверсе. Посредством электродуговой сварки горизонтальная вставка соединяется со стальным кронштейном, а посредством сварки в аргоне — со штангой. Затем, к алюминиевому слою вставок с противоположных сторон привариваются взрывом два алюминиевых листа. Эта конструкция обладает высокой резистентностью к действию статических и динамических нагрузок, однако, сложна в изготовлении. Показатели надежности те же, что и в предыдущей конструкции, а удельное электросопротивление контакта существенно ниже.

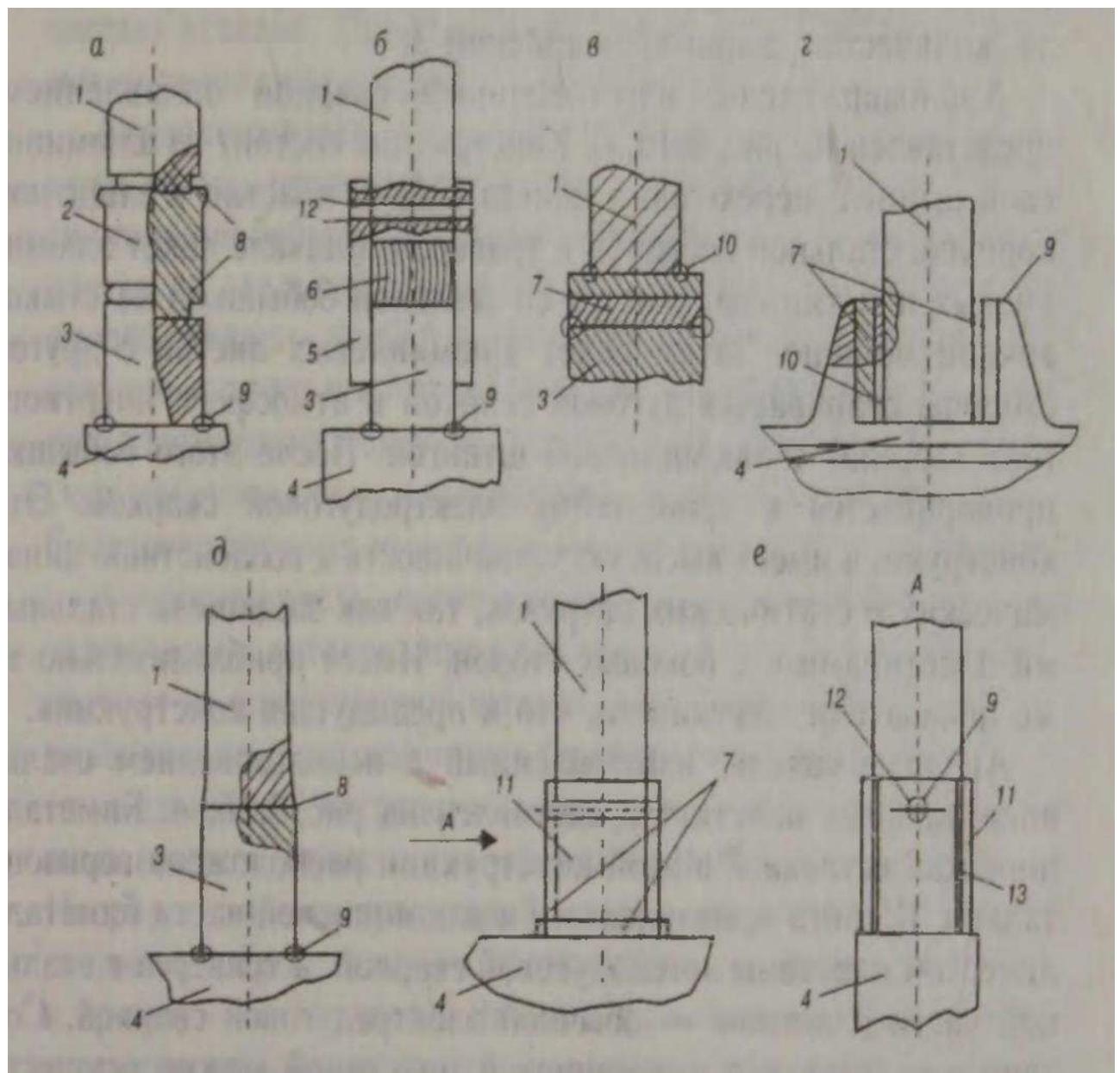


Рисунок 13 - Типы неразъемных соединений алюминиевая штанга — траверса: 1 - штанга алюминиевая; 2 - вставка алюминиевая; 3 - бобышка стальная; 4 - траверса; 5 - пластина стальная; 6 - пластины стальные; 7 – вставки из сталь-алюминиевая; 8 - сварка трением; 9 - электродуговая сварка; 10 - сварка электродуговая в среде аргона; 11 - лист алюминиевый; 12 - штифт стальной; 13 - сварка взрывом соединения алюминий-алюминий.

Таблица 2 - Средние значения падения напряжения на переходных участках анододержателей при номинальной токовой нагрузке, мВ

Измеряемый участок	Вариант соединения (см. рисунок 6)					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>g</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Штанга – стальная бобышка	8,0	-	7,0	-	3,3	-
Стальная бобышка – траверса	55,0	-	30,	-	36,3	-
Штанга – траверса	64,0	50,0	37,0	40,0	39,6	25,0
Штанга – ниппель	102,0	75,0	78,0	7,0	-	-

Для перечисленных выше вариантов соединений анододержателей в таблице 2 приведены суммарные значения падения напряжения на участке штанга - кронштейн. Полное падение напряжения в анодном узле (алюминиевая штанга — боковая стенка анода на глубине 200 мм) составляет 250-300 мВ.

Из приведенных в таблице 2 сведений можно сделать следующие выводы:

- наибольшее электрическое сопротивление имеет сварной шов стальная бобышка — стальная траверса;
- минимальное сопротивление имеют сварные соединения алюминиевой штанги с алюминиевой пластиной и соединения сталь — алюминий;
- экономичной, с точки зрения потери напряжения, является конструкция с использованием одной горизонтальной биметаллической пластины, как показано на рисунке 13в; эта же конструкция отличается небольшой протяженностью сварных швов и малой металлоемкостью.

Анализ конструкций анододержателей на отечественных и зарубежных предприятиях показывает, что наиболее распространенным вариантом соединения, штанга-кронштейн является конструкция рисунок 13в. Довольно распространен также вариант 13г (две биметаллические пластины, установленные вертикально) и вариант 13д (прямая сварка трением сталь-алюминий).

Вариант конструкции 13г отличается высокой механической прочностью. Если по вариантам, 13а и 13б, разрушение на испытательном стенде наступает

после 1-2 ударов, то по варианту 13г — после 10 ударов (ТадАЗ). Однако, капитальный ремонт анододержателей такой конструкции более сложен [20].

Анододержатель в сборе с обожженным анодным блоком должен представлять качественное изделие с высокой эксплуатационной стойкостью, в том числе к аварийным режимам работы, быть технологичным в изготовлении; иметь минимальные потери напряжения по всем узлам сварки и в соединении ниппель-анод [21].

Вернемся к проблеме получения качественного сталь-алюминиевого соединения. Алюминий отличается по своим физико-химическим свойствам от железа и сталей, что и определяет трудности при сварке. Причем основным препятствием сохранения качественных сварных соединений железа с алюминием, как уже отмечалось, является химическое взаимодействие этих металлов с образованием хрупкой прослойки интерметаллидов. В результате, резко возрастает электрическое сопротивление контакта и снижается его механическая прочность.

Прочность сварного соединения тем выше, чем тоньше слой интерметаллидов. Процесс образования интерметаллидов начинается при 300 °C и интенсивно возрастает при 500 °C. Наилучшим способом избежать этих явлений, использование биметаллических пластин с хорошим контактом составляющих компонентов, в том числе барьераного слоя.

Лучших результатов при изготовлении биметаллических пластин удается достичь путем сварки-взрывом. Механизм сварки-взрывом можно понять из рисунка 14. При взрывном горении заряда верхняя пластина 2 прогибается и под действием ударной волны сращивается с материалом подложки. Сварка-взрыв наиболее эффективна для соединения пластин и листовых материалов. Верхняя подложка должна быть восприимчива к действию ударной волны [22].

Внимание следует уделять контактным соединениям по границе сталь-сталь. Это относится к конструкции траверсы и ниппельным соединениям, которые подвергаются наибольшему коррозионному и абразивному износу. Наиболее быстро изнашиваемым элементом анододержателя являются стальные

ниппели. Во время заливки ниппелей в гнезда анодных блоков происходит следующее:

- разваривание поверхности ниппеля расплавленным чугуном;
- пригар чугунной заливки к ниппелю;
- коррозионный износ его поверхности.

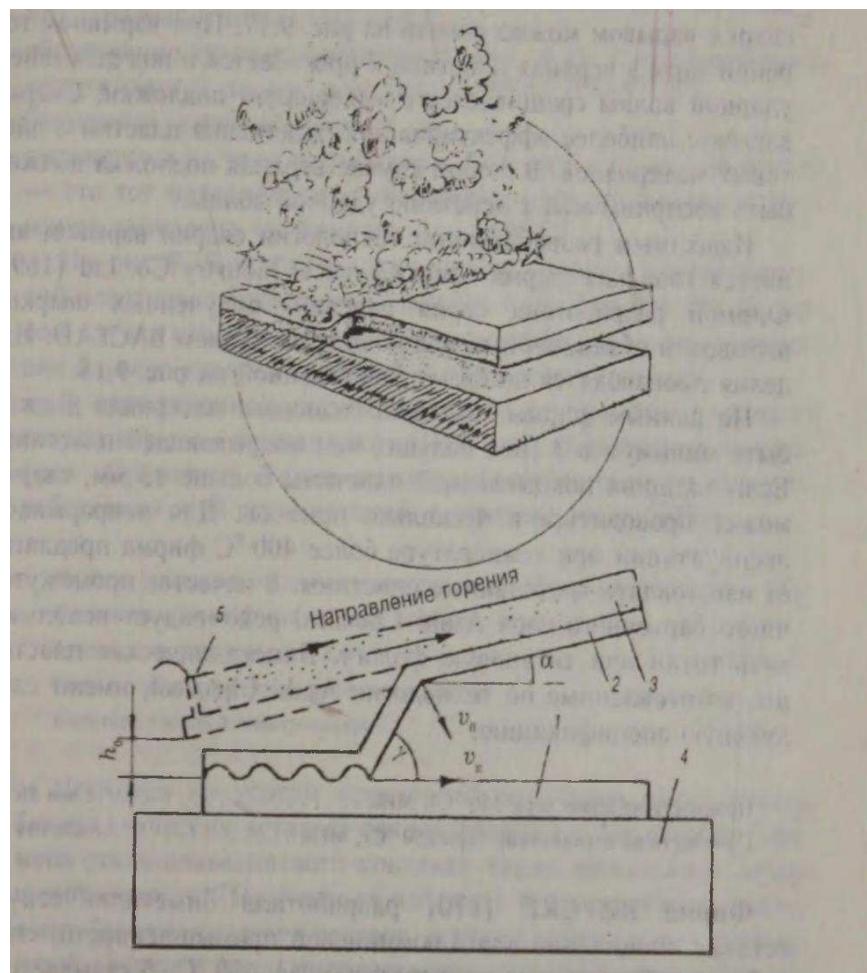


Рисунок 14 - Схема сварки взрывом: 1 — неподвижная пластина; 2 — покрывающая пластина; 3 — заряд ВВ; 4 — основание; 5 — детонатор;  $h_0$  — исходное расстояние;  $\alpha$  — угол наклона пластины

Смачиваемость ниппеля чугуном весьма низкая, в результате, между поверхностью ниппеля и чугунной заливкой образуются раковины. Из-за наличия раковин, токовая нагрузка на границе ниппель-чугун распределяется неравномерно, образуя контактные электрические дуги с привариванием части чугунной заливки к ниппелю. По мере сгорания анода и приближения ниппелей

к поверхности электролита, температура ниппельных узлов возрастает до 500 °C и выше. Из-за разницы температурного расширения угольного анода, чугунной заливки и стального ниппеля давление на ниппели возрастает. Обжатие ниппеля приводит к тому, что форма постепенно становится конусообразной, а средний диаметр уменьшается. К примеру, если исходный диаметр ниппеля составляет 110 мм, то браковочной величиной считается средний диаметр 90 мм и ниже (через 2-2,5 года после начала эксплуатации).

Износ ниппелей проявляется механическим путем, особенно если учесть пригар чугуна к ниппелям. В случае пригара чугуна пресс для снятия чугунной заливки развивает предельные нагрузки, которые приводят к абразивному износу поверхности ниппелей. Любой пригар приведет к интенсивному износу ниппелей.

С целью предотвращения высокого износа ниппелей, при монтаже используется покрытие их поверхности графитовым порошком. В 70-80-е годы использовали способ сухого покрытия, а с конца 80-х годов — мокрое покрытие с помощью коллоидно-графитового препарата (сuspензии тонкодисперсного графита на водной основе). Препарат заливается в специальную емкость с системой рециркуляции для предотвращения расслаивания супензии. При подъеме емкости все ниппели одного анододержателя погружаются на -110 мм в супензию и при опускании емкости оказываются покрытыми слоем препарата. После сушки, на поверхности ниппеля образуется плотное и прочное покрытие из графитового порошка, не смачиваемого чугуном. Эксплуатационная стойкость ниппелей при обработке графитовой супензией возрастает более чем на 30%, величина контактного напряжения анод-ниппель снижается на 10%, пригар чугуна к ниппелям отсутствует.

Следует отметить, что продолжительность службы ниппелей можно путем увеличения их диаметра, например, с 110 до 120-130 мм. В зарубежной практике, известны примеры применения ниппелей диаметром до 180 мм. С экономической точки зрения, неразумно заменять весь анододержатель в сборе, у которого имеются повреждения только ниппеляй. Поэтому, при ремонте анододержателей, с помощью газовой резки, удаляется поврежденная часть ниппеля, а к срезу, с помощью сварки, стыкуется новая цилиндрическая приставка (бобышка) (рисунок 15)

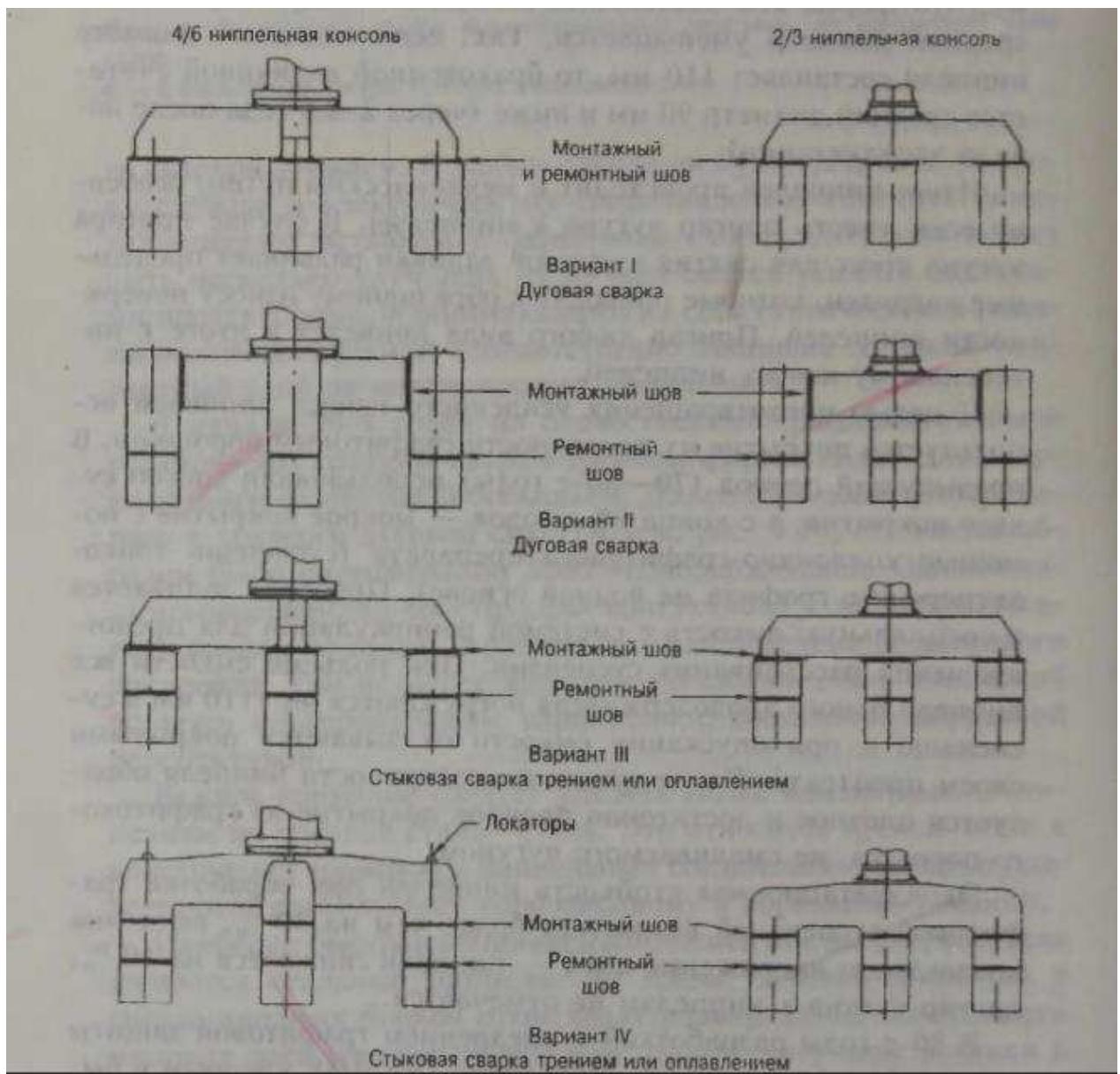


Рисунок 15 - Схема установки ниппелей при монтажных и ремонтных работах

В первые годы широкого распространения электролизеров с обожженными анодами, повсеместно использовались методы электродуговой сварки при ремонте ниппелей. На некоторых предприятиях эта технология сохранилась до настоящего времени. Так же был разработан метод стыковой сварки-оплавлением. Сущность сварки-оплавлением заключается в том, что специально подготовленные поверхности двух свариваемых деталей нагревались дуговой или плазменной обработкой и сближались под давлением. Образовавшиеся наплывы удалялись механической обработкой [23].

Специальные машины, сконструированные для выполнения операций сварки-оплавления, проводят полный цикл сварки одного ниппеля в автоматическом режиме за 4 мин. С созданием высокопроизводительных линий ДИМ появилась потребность в дальнейшем усовершенствовании линий ремонта анододержателей. В соответствии с этим, была разработана вертикальная автоматическая машина для сварки-оплавления, способная ремонтировать анододержатели с несколькими ниппелями в вертикальном положении, что дает возможность использовать сварочную машину непосредственно в существующих подвесных конвейерных системах, а затем возвращать их обратно на конвейер после завершения работ. В настоящее время, на предприятиях много машин такого типа, которые работают по программе ремонта ниппелей.

Следующее поколение сварочных машин основано на принципе сварки трением. Сварка трением происходит под воздействием тепловой энергии, генерируемой при трении поверхностей свариваемых деталей. Трение возникает при вращении в противоположных направлениях двух деталей круглой или прямоугольной формы, соприкасающихся торцами и прижимаемых друг к другу в осевом направлении. Получаемая тепловая энергия вызывает интенсивный нагрев тонких пограничных слоев металла до температур, необходимых для их подплавления и образования сварного соединения. При достижении требуемой температуры, относительное движение деталей должно быть прекращено.

Процесс образования сварного соединения завершается проковкой или пропрессовкой сварного соединения. С этой целью к остановленным после вращения деталям на короткое время прикладывается сжимающее их осевое усилие. В результате образования металлических связей, по всей площади кон тактирующих деталей получают прочное соединение.

Принцип действия сварки трением показан на рисунке 16. Производительность современной машины сварки трением составляет до 15 сварочных операций в час. Оба типа машин: сварки оплавлением и сварки трением — дают важное преимущество в том, что позволяют получить гарантированный контакт по всей площади поперечного сечения ниппеля. Выбор схемы ремонта ниппельных устройств (см. рисунок 13) зависит от многих факторов, в том числе от конструкции траверсы и ниппелей, наличия тех или иных сварочных агрегатов, от объема производства [24].

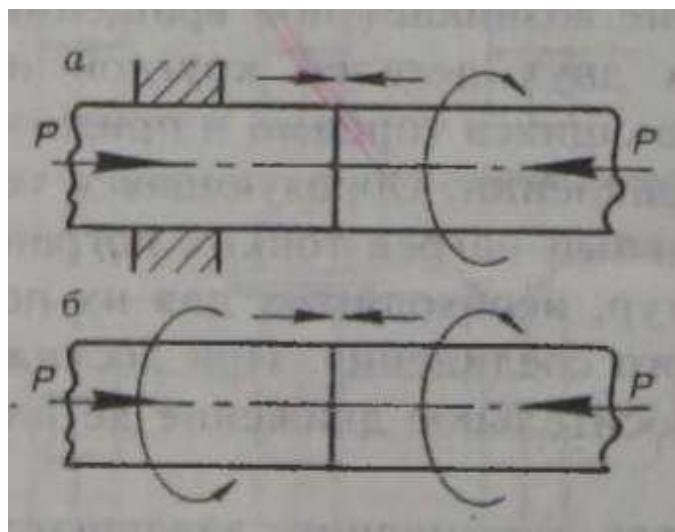


Рисунок 16 - Принцип работы машины сварки трением: *а* — вращение одной детали; *б* - вращение обеих деталей

Вариант 1 (рисунок 13) ремонта ниппелей наименее экономичный, так как при каждом повторном ремонте происходит износ траверсы в месте приварки ниппеля. Более экономичен вариант II, когда ремонтный шов переносится на ~~нужно~~ изношенной части ниппеля.

По конструкции I и III варианты (рисунок 13) оформлению не отличаются, однако переход с ~~помощью~~ ремонта шва по III варианту упрощает процесс ремонта.

В конструкции варианта IV установлены так называемые локаторы. С их помощью удается с повышенной точностью совмещать оси свариваемых компонентов (бобышек и ниппелей), а также выдерживать точную высоту ниппелей. Следует отметить, что конструкция траперсы по IV варианту наиболее удачна. Сплошная литая конструкция достаточно прочна и позволяет вести монтаж ниппелей с повышенной точностью.

Промышленность выпускает несколько типов сварочных машин современной конструкции. Фирма A.I. Welders Ltd (Англия) является разработчиком и изготовителем машин сварки трением для ремонта ниппелей анододержателей в вертикальной позиции. В отечественной промышленности работают машины фирмы «Кук», поставка KHD. Финская фирма Kumera Согр также производит машины сварки трением для ремонта конструкция этой машины такова, что анододержатель с подвесного конвейера легко подается на сварочную машину, а после завершения всех операций возвращается обратно на конвейер (рисунок 17) [25].

Машина снабжена автоматической системой установки шпилек, которые автоматически подаются из контейнера и зажимаются в патроне. Весь цикл ремонта одного ниппеля составляет 3 мин 20 с, включая удаление наплыков.

После завершения вращательного цикла, когда поверхностный слой торцевой части заготовок покрыт тонким слоем расплавленного металла, проводится проковка свариваемых изделий. Для этих целей, в подвальной части машины установлены специальные цилиндры, с помощью которых проводятся ударное воздействие по торцу бобышки и проковка сварного шва [26].

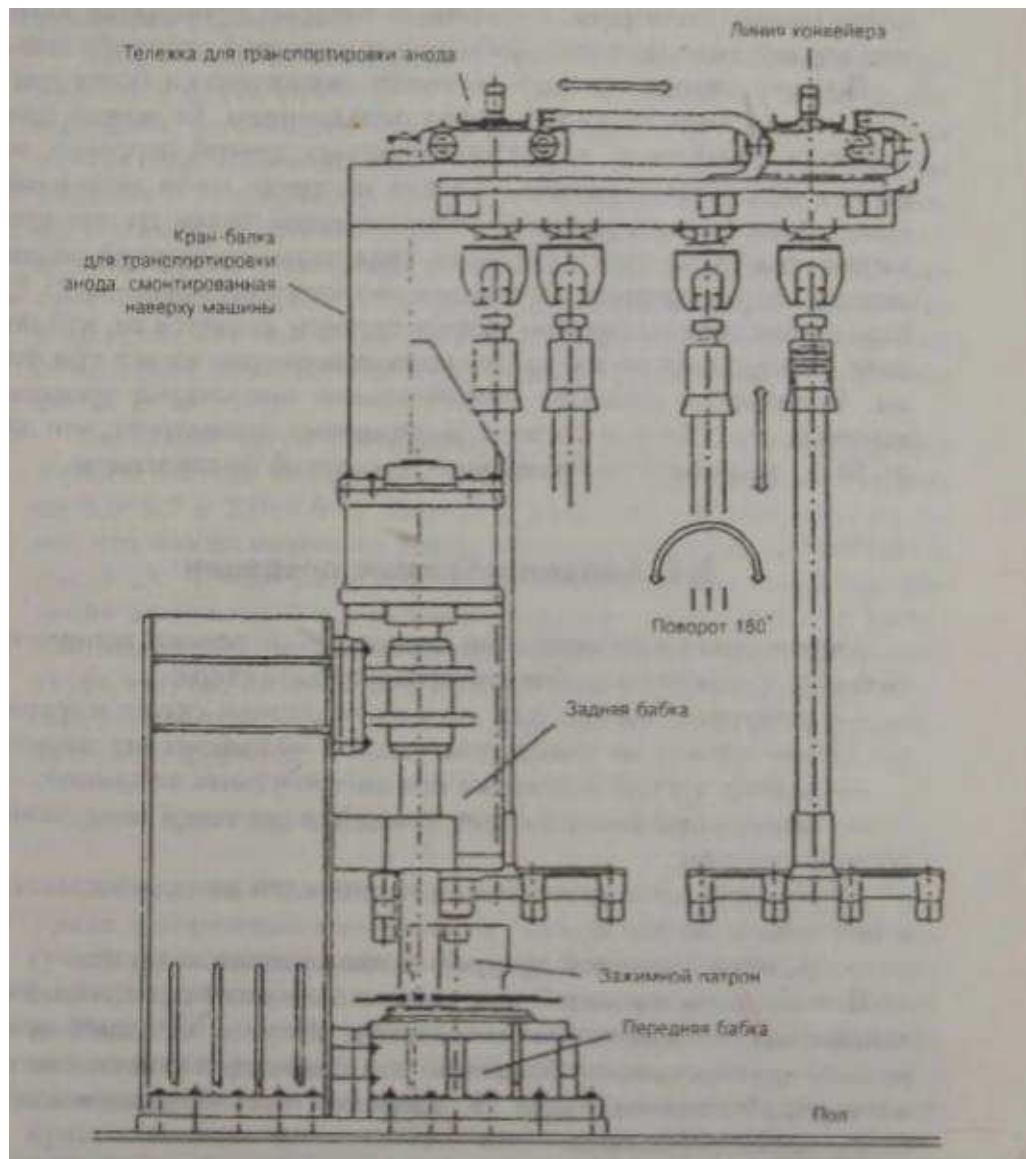


Рисунок 17 - Машина сварки трением фирмы Kumera Согр, (Финляндия)  
ниппелей

Процесс сварки трением является экологически чистым, чем дуговая сварка и сварка оплавлением. Ее можно проводить в помещении, в котором работает персонал, не рискуя нарушить условия труда, из-за выделения газов, дыма или искрения. С экономической точки зрения, преимущества также неоспоримы: по сравнению со сваркой оплавлением, сварка трением дает экономию электроэнергии на 25%. Еще одним преимуществом сварки трением является то, что подача электроэнергии распределяется равномерно на все три фазы. Количество металла, потребляемого при сварке трением, минимально (13-

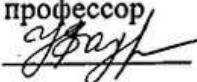
14 мм длины свариваемых цилиндров), что дает 50 % экономию по сравнению со сваркой оплавлением [27].

[изъято 38 страниц]

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

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

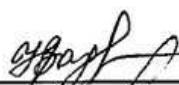
УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук,  
профессор  
 Н.В. Белоусова

« 10 » 07 2020 г.

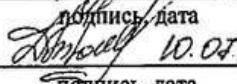
### Магистерская диссертация

Увеличение срока службы кронштейнов анододержателей алюминиевых  
электролизёров

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель  д.х.н., профессор Н.В. Белоусова  
подпись, дата

должность, ученая степень

Выпускник  10.07.2020. Д.И. Тюменцев  
подпись, дата

Рецензент  Директор ДАМ  
ПАО «РУСАЛ Братск» филиал в г. Шелехов Б.В. Патин  
подпись, дата

должность, место работы

Консультант экономического  к.э.н., доцент Т.В. Твердохлебова  
раздела

подпись, дата

должность, ученая степень

Красноярск 2020