

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  
\_\_\_\_\_ Н.В. Белоусова

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

Повышение надёжности комплексов получения прокалённого кокса

с применением современных материалов и технологий

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель/  
руководитель \_\_\_\_\_

подпись, дата

к. т. н., доцент

должность, ученая степень

А.И. Рюмин

инициалы, фамилия

Выпускник \_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Г. Гринкевич

инициалы, фамилия

Рецензент \_\_\_\_\_

подпись, дата

директор ДАМ «РУСАЛ Братск»

должность, ученая степень

Я.В. Гудов

инициалы, фамилия

Консультант экономического  
раздела \_\_\_\_\_ к. э. н., доцент

подпись, дата

Т.В. Твердохлебова

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

## АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации – «Повышение надёжности комплексов получения прокалённого кокса» Диссертация представлена в объёме 71 страницы, включает в себя 14 таблиц, 35 иллюстраций, список использованной литературы, состоящий из 51 источников.

.Цель работы направлена на повышения надёжности прокалочных комплексов дирекции анодной массы, стабилизация технологического процесса прокалки нефтяного кокса.

Задачи: изучить современную техническую литературу по теме производства анодной массы, в частности производства прокалённого кокса, проанализировать существующие проблемы производства, провести исследования и предложить решения, направленные на повышения надёжности оборудования

Основные выводы:

1. проведены исследования по влиянию температуры на металлоконструкции прокалочных комплексов. Определена природа их преждевременного разрушения. Доказано опытным путём, что стойкость к агрессивной среде прокалочной печи, аустенитной стали 20Х23Н18, превышает в 30 раз показатели применяемой стали Ст3. Проработаны и внедрены технические решения повышения надёжности основных узлов комплекса;

2. решая проблему надёжности загрузочного лотка, сделаны предложения по использованию горячего воздуха, полученного от охлаждения загрузочного лотка, в целях частичной замены электрического источника теплоносителя для сушки подштырьевой анодной массы.

3. В разделе экономического обоснования проекта нами были сопоставлены текущие затраты на ремонт и затраты с учётом изменения конструкции отдельных узлов прокалочных комплексов «РУСАЛ Братск». Отражены предложения по увеличению межремонтного периода прокалочных комплексов с сокращением плановых простоев на 30 суток, что позволит дополнительно выпустить в год более чем 8,5 тысяч тонн прокалённого кокса общей стоимостью более 80 млн. руб.

Ключевые слова: НАДЁЖНОСТЬ АНОД, ПРОКАЛЁННЫЙ КОКС, АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ. ТЕМПЕРАТУРА, КОРРОЗИЯ

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Сырьё и производство анодной массы и анодов электролизёров алюминиевой промышленности .....	5
1.1 Характеристика сырья и готовой продукции .....	5
1.2 Каменноугольный пек .....	5
1.3 Электродный кокс .....	9
1.4 Технологический процесс производства анодов .....	15
2 Прокаливание электродного кокса .....	19
2.1 Теория прокаливания .....	19
2.2 Подготовка, прокаливание кокса .....	20
2.3 Энерготехнологические комплексы для прокаливания кокса .....	27
2.4 Технологический расчёт барабанной печи .....	32
3 Надёжность прокалочных комплексов .....	42
3.1 Загрузочный лоток .....	54
3.2 Холодный обрез .....	57
3.3 Горячий обрез печи .....	60
3.4 Горячий обрез холодильника .....	62
4 Экономическое обоснование .....	65
4.1 Повышение надёжности и снижение затрат на ремонт .....	65
4.2 Сокращения времени плановых простоев прокалочных комплексов...	65
4.3 Оценка рисков проекта .....	66
4.4 Выводы .....	66
Заключение .....	67
Список использованных источников .....	68

## ВВЕДЕНИЕ

С 1886г., единственным промышленным способом получения алюминия является электролиз криолит-глиноземного расплава (процесс Холла — Эру). Суть процесса основана на растворении оксида алюминия  $Al_2O_3$  в расплаве криолита  $Na_3AlF_6$  и дальнейшим электролизом, где анодом и катодом в процессе используют коксовые электроды. В России на алюминиевых заводах применяют технологию получения алюминия с обожжёнными и самообжигающимися анодами. В процессе электролиза происходит расход анода в среднем 500 – 600 кг., на одну тонну полученного алюминия. Развитие процесса производства алюминия предъявляет всё более высокие требования к конструкции электролизёров. Уменьшение трудозатрат на его обслуживание, уменьшение затрат на электроэнергию, оптимизацию условия труда и достижение объёмов выбросов, не превышающих предельно допустимых концентраций вредных промышленных выбросов на фоне повышения единичной мощности электролизёра. На этом фоне к анодам также предъявляются высокие требования. Наиболее значимые из них такие как: необходимая электропроводимость, стойкость в агрессивной среде криолит-глиноземного расплава, терпимость к влиянию экстремальных температур, достаточная механическая прочность, низкая зольность, а также невысокая стоимость. Эти требования резко ограничивают выбор материалов для изготовления анодов. Наиболее подходящими по физико-химическим свойствам являются углеродистые материалы [1]. Для производства электродов больше всего подходит нефтяной кокс. Прокалённый кокс превращается в чистый и сверхчистый углеродистый материал с высокой электропроводностью, температуростойкостью, химической стойкостью, а также антифрикционной способностью при сохранении свойств, необходимых для конструкционных материалов. К этому необходимо добавить его относительно невысокую стоимость и сравнительно легкую обрабатываемость [2]. Спрос на нефтяной кокс постоянно растёт. Это связано, прежде всего, с быстрым ростом производства высоколегированных и специальных сталей, цветных металлов, некоторых химических продуктов, электроэнергии, а также с развитием машиностроения, атомной энергетики, реактивных технологий и т. д. Все эти отрасли являются потребителями кокса и диктуют увеличение его производства. По оценкам BusinesStat, с 2014 по 2018 годы продажи нефтяного кокса увеличились на 7,4% с 126,5 до 135,9 млн тонн. По мнению экспертов, наибольшее увеличение спроса на нефтяной кокс ожидается в сегменте кальцинированных анодов, необходимых для производства алюминия. Ежегодный рост здесь составит в среднем 5-7%.

На алюминиевых заводах качество анодов оказывает непосредственное влияние на работу электролизеров в электролизных цехах[4]. При этом такое влияние может быть либо положительным, либо отрицательным. Качество поставляемых анодов для электролизеров с обожженными анодами, а также анодной массы для электролизеров Содерберга может превратить высокоэффективное предприятие в низкоэффективное!

Чистота нефтяного кокса это основная характеристика, определяющая пригодность кокса для производства анодной массы. На мировом рынке возрастает доля коксов с увеличенным содержанием серы и примесей. Причина – качество сырой нефти, поступающей на нефтепереработку, продолжает ухудшаться. Высокосернистые соединения более доступны и дешевле, чем нефть парафинового основания с низким содержанием серы. Неудалённые металлы и сера при добыче нефти скапливаются в потоке осадков, а далее, после процесса коксования, в коксе. Поэтому, содержание металлических примесей в сырой нефти, в частности ванадия, обычно растёт пропорционально содержанию серы [5]. Уровень содержания серы в нефтяном коксе определяет конечное назначение кокса. Кокс, содержащий серу в количестве 2 % по массе или менее, обычно подходит для производства анодов (основной продукт производства ОК «РУСАЛ»). Часть кокса с содержанием серы 2,01–3,00 % масс, смешивается с малосернистым коксом и также используется для производства анодов. Нефтяной кокс, в котором содержание серы составляет 2,01–5,00 %, используется как топливо. Как уже отмечалось, качество анодной массы - это одно из важнейших составляющих эффективного производства алюминия. В свою очередь без соответствующего качества прокалённого кокса не может быть анодной массы, отвечающей всем требованиям электролизного производства[6]. В условиях изменения качественных характеристик зелёного нефтяного кокса, а также для получения прокалённого кокса с соответствующими технологическими параметрами возрастают требования, предъявляемые к технологическому оборудованию.

# 1 СЫРЬЁ И ПРОИЗВОДСТВО АНОДНОЙ МАССЫ И АНОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЁРОВ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## 1.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Сырьё для производства анодной пасты подразделяют на группы: твердые углеродные материалы (кокс) и связующие (смола). Преимущественно смола и нефтяной кокс используются в качестве твердых материалов, которые будут наполнителем, «каркасом» будущей массы анода, а пек каменноугольной смолы используется для соединения этого каркаса в монолит. Почему остановились на этих материалах для производства анодов? Важным составляющим для электролитического производства является низкая зольность материалов (не более 0,5 %), [7]. Известно, что: ванадий, железо, кремний, медь, цинк и другие вредные металлические для электролитического алюминия примеси полностью переходят в него и снижают его качество. Кроме того, способность прокалённого нефтяного кокса и каменноугольного пека после спекания позволяют конструировать композиционную структуру, которая превосходит свойства кокса и пека по отдельности. Для подвода тока к зоне электрохимической реакции оптимально подходит связка из этих компонентов, так как они обладают необходимой электропроводностью, а термостойкие свойства этих материалов после спекания, работая в химически агрессивной среде при температуре 950-1000 °С, соответствуют необходимым свойствам. Подготовка производства с подбором исходных материалов (пек, кокс), их физико-химические свойства, пропорции и многое другое, является наиболее сложной задачей. Нефтепереработка и коксохимия определяют основные свойства компонентов анодной массы, а многие структурно-химические качества исходных продуктов - от первичных смол, тяжёлых остатков нефтепереработки, примесей и т.д. до качественных характеристик анодов в электролизёре. Технологические требования к качеству электродной смолы и кокса приведены ниже. [1]

## 1.2 Каменноугольный пек

Продуктом производства кокса является каменноугольная смола, получаемая из коксовой смолы путем коксования специальных видов угля (коксование) в коксовых батареях. Помимо смолы, они получают: кокс и коксовые газы. Кокс из коксующихся углей содержит много минеральных примесей и не подходит для производства электродов. Основным сырьем для производства каменноугольной смолы, как упоминалось ранее, является коксующаяся смола, так как она имеет низкое содержание примесей, в трубчатой печи смола нагревается до 300-350 °С, обрабатывается воздухом и легко кипит. фракции удаляются из него, шаг в этом процессе называется оставшаяся масса чёрного цвета, блестящая, с плотностью 1,25-1,30 г/см<sup>3</sup> – готовый пек это

вещество в виде пластинок и гранул. Углерод и водород составляет основу пека [1], полный химический состав смолы очень мало изучен, и в ее состав помимо водорода и углерода входят: кислород, сера и ряд других химических элементов.

Группы-доли смолы различаются по молярной массе по своим свойствам и условно обозначаются  $\mathcal{L}$ ,  $\beta$   $\gamma$  - фракциями:

- Продукты уплотнения ароматических соединений и минеральных примесей в печи, которые представляют собой высокомолекулярные соединения, которые состоят из нерастворимых в толуоле остатков, называются  $\mathcal{L}$  - фракцией.

- Фракция, которая увеличивает связывающую способность смолы, которая обладает хорошей способностью к спеканию, растворима в бензоле и толуоле, но не растворяется в петролейном эфире - эта фракция называется  $\beta$ -фракцией (или асфальтенами).

- Фракция, которая обеспечивает текучесть смолы, снижает температуру размягчения и способствует смачиванию шихты кокса смолой [8], содержит наиболее низкомолекулярные компоненты смолы (масло, смола), растворяется в петролейном эфире, бензине, бензол называется  $\gamma$  - фракция (или мальтены).

Требования, предъявляемые к физико-химическим показателям каменноугольного электродного пека должны соответствовать требованиям и нормам, указанным в таблице 1, [9]. Пеки с повышенной температурой размягчения отличаются от среднетемпературных большим содержанием ценных фракций группового состава – асфальтенов и свободного углерода, а при спекании дают больший выход кокса, что благоприятно сказывается на формировании структуры анодной массы, поэтому наиболее приемлем пек каменноугольный марки В и его применяют изготавливая анодную массу.

Таблица 1 -Свойства электродного каменноугольного пека марок А, Б, Б1, В

№ п/п	Показатели	А	Б	Б1	В
1	Температура размягчения °С	65-70	67-73	72-76	85-90
2	Содержание веществ, нерастворимых в хинолине ( $\mathcal{L}$ 1-фракция), %, не более	6	8	10	12
3	Содержание веществ, нерастворимых в толуоле ( $\mathcal{L}$ -фракция), %	24-28	25-31	26-31	≥ 31
4	Выход летучих веществ, %	59-63	58-62	не более 59	53-57
5	Плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	Ненормируется	1,30	1,31	1,32
6	Отгон до 360°С, %, не более	10	Ненормируется	Ненормируется	Ненормируется
7	Зольность, %, не более	0,3	0,3	0,3	0,3
8	Содержание воды, %, не более: жидкий пек твердый пек	0,5 4,0	0,5 4,0	0,5 4,0	0,5 4,0

Качество анодов при этом улучшается, а расход анодной массы снижается. На установках непрерывного действия через дистилляцию каменноугольных смол осуществляется производство каменноугольного пека[10]. В качестве примера на рисунке 1 показан, как работает один из крупнейших в мире заводов по переработке смолы на заводе Rutgers VFT в Германии в Кастроп-Роакселе. Этот завод способен перерабатывать до 500 000 тонн смолы в год.



Рисунок 1 - Завод Rain Carbon, фото ©hydrocarbonprocessing.com

Схема использует более тонкое фракционирование, что позволяет получить 7 фракций с очень узкими пределами температуры кипения и высоким содержанием основного компонента, которые подходят для получения чистых химических продуктов. В качестве некипящего остатка смола отделяется. Первая колонна этого устройства работает под атмосферным давлением, и в ней отделяется легкая фракция смолы и воды. Легкая фракция после отделения воды объединяется с фенольной фракцией, полученной на второй колонне. Фенолы и крезолы извлекаются из этой смеси. Дистилляцией масла, не содержащего фенолов, получают фракции индена для последующего производства инденкумароновых смол. Во второй колонне, также работающей при атмосферном давлении, получают фракцию нафталина, которая отделяется от низкокипящих компонентов в колонне. В результате следующих нескольких стадий кристаллизации получается нафталин с чистотой более 99%. Нижний продукт из второй колонны направляется в третью колонну, которая работает под вакуумом. В нем метилнафталиновая фракция получается в качестве основного продукта, из которого хинолин и хинальдин экстрагируются экстракцией и повторной перегонкой. Можно использовать безосновную смесь 1- и 2-метилнафталинов. как хороший ароматический растворитель. Продукт,



извлекаемый из этой колонны путем боковой экстракции, представляет собой абсорбционное масло и используется для извлечения бензола из коксового газа. Путем повторной перегонки и кристаллизации этой фракции аценафтен восстанавливается.

Четвертая колонна, также работающая в вакууме, представляет собой антрацен; здесь антраценовое масло удаляется как верхний продукт. Помимо возможности использования специальной сажи в качестве сырья, антраценовое масло содержит антрацен и карбазол, которые экстрагируются и используются при производстве красителей. Последний столбец - смола - работает в очень высоком вакууме и служит для получения смолы с высокими температурами размягчения. С верха этой колонны извлекается самое высококипящее пиреновое масло, из которого извлекается пирен, используемый для получения красителей. Интенсивное фракционирование, включающее циркуляцию через нагреватель, рекуперацию тепла и большое количество клапанных тарелок на колоннах, является очень эффективным, о чем свидетельствует 90% выход нафталина с чистотой выше 90%. Технологическая схема дистилляции каменноугольного пека показана на рисунке 2.

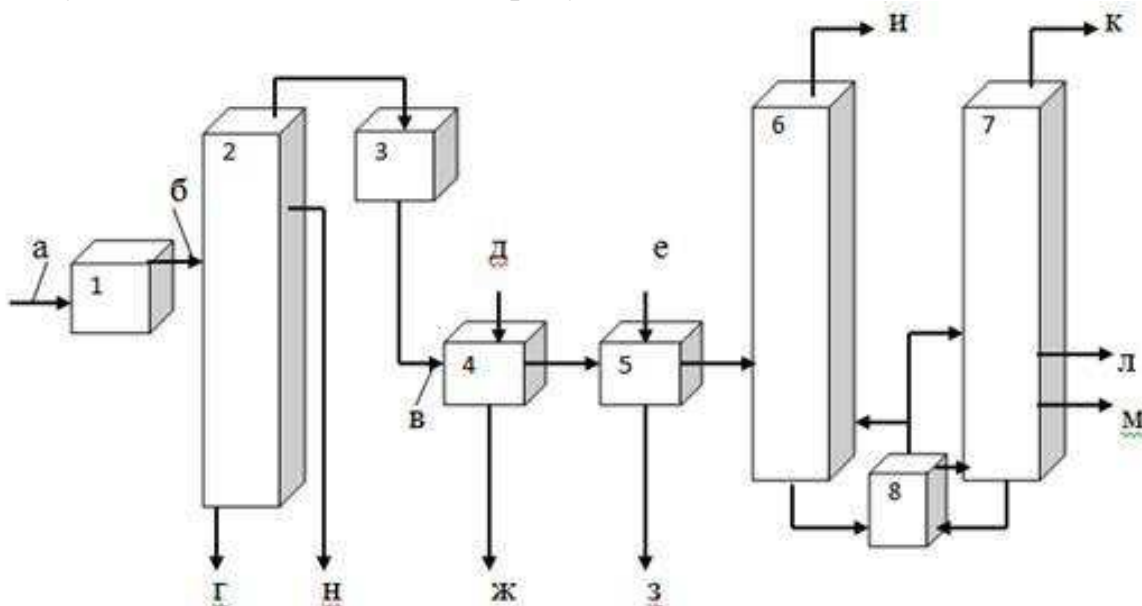


Рисунок 2 - Принципиальная схема переработки каменноугольной смолы с отбором широкого дистиллята: 1 - трубчатая печь; 2 - фракционная колонна-испаритель; 3 - конденсатор; 4 - система извлечения фенолов; 5 - система извлечения оснований; 6, 7 - ректификационные колонны; 8 - трубчатый нагреватель; а - обезвоженная смола; б - паросмоляная эмульсия; в - широкий дистиллят; г - пек; д - раствор едкого натра; е - раствор серной кислоты; ж - раствор фенолятов; з - раствор сульфатов оснований; и - нейтральной легкое масло; к - технический нафталин; л - поглощительное масло; м - тяжелый остаток; н - антраценовая фракция. ¶

### 1.3 Электродный кокс

Для производства анодов из алюминиевых электролизеров нефтяной кокс является основным сырьем, качество которого зависит от технологического процесса производства алюминия.

При производстве анодов используется нефтяной кокс, и его качество является безусловным важным фактором. Кокс должен обладать следующими свойствами:

- минимальная зольность и отсутствие каталитических примесей;
- высокая устойчивость к кислороду и  $\text{CO}_2$ ;
- низкая пористость и удельное электрическое сопротивление от 460 до 540 мкОм • м;
- приемлемая для обработки механическая прочность и хорошая микроструктура, [11].

Нефтяной кокс является вторичным продуктом перегонки нефти, но не весь кокс является электродом. Наибольшее количество асфальтенов в тяжелой нефти и это предпочтительное сырьё для производства кокса. Электродный кокс получают на установках замедленного коксования (УЗК), марки КЗ-8 и КЗ-0. Сырье готовят и подвергается глубокому термическому разложению на установках замедленного коксования УЗКб. Узел медленного коксования, показанный на рисунке 3, состоит из двух камер холодного коксования (высота 30 м, диаметр до 8 м), камеры разложения, трубчатой печи, насосов, вспомогательного оборудования. Поток разогретого в трубчатой печи сырья (490-510 °С) под давлением направляется в камеру коксования. Из-за высокой скорости потока сырья коксование на стенках труб не происходит. По мере заполнения, в результате реакций расщепления и полимеризации углеводородов («процесс медленного коксования»), запускается процесс спекания. Камера снизу заполняется, это увеличивает эффективность коксования благодаря непрерывному взаимодействию получаемого кокса с потоком свежего горячего сырья. Материал в нижней части камеры сформирован в виде губчатой структуры, через которую проходят жидкие продукты и газы, повышая степень содержания углерода в коксе.

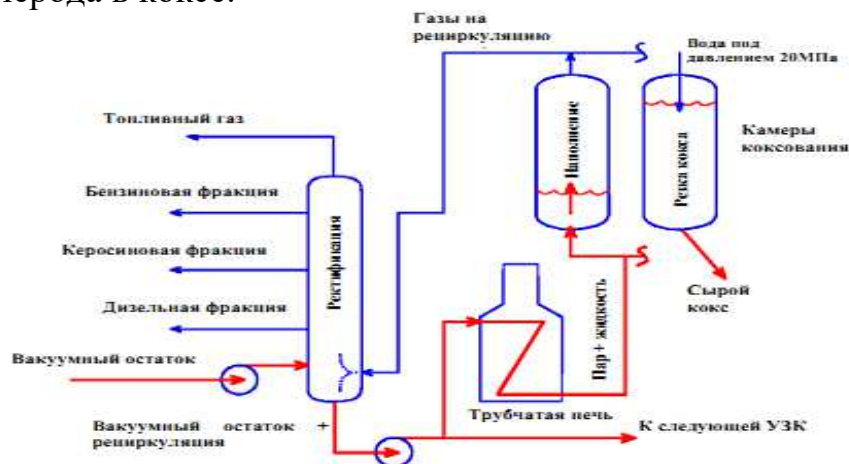


Рисунок 3 - Схема установки процесса замедленного коксования

Кокс образуется со скоростью  $\sim 1$  м / ч, при температуре  $450^\circ\text{C}$  и давлении в несколько атмосфер. Летучие продукты реакций разложения покидают камеру и сбрасываются в ректификационную колонну, где они делятся на три потока: топливный газ, жидкое топливо и тяжелые нефтепродукты. Тяжелые компоненты, которые не успевают полностью прореагировать в одном цикле коксования, смешиваются со свежим сырьевым потоком и направляются на переработку в камеру коксования. Когда камера заполнена 75-80 %, поток сырья переключают на загрузку второй камеры. Свежий кокс охлаждают в два этапа, сначала паром, затем водой, прокачивая через пористую структуру кокса. В центре коксового пирога водяной струей высокого давления прорезается пилотная скважина. Далее пирог режется и разгружается в бассейн с водой.

Для качества будущего кокса крайне важна глубина перегонки в ректификационной колонне лёгких фракций в остатках. Чем глубже степень отгона, тем выше насыпная плотность кокса, выше содержание асфальтенов, и металлических примесей в золе. Образующаяся при этом структура называется губчатой (Sponge Coke), и представляет смесь анизотропного и изотропного углерода (рисунок 4а).

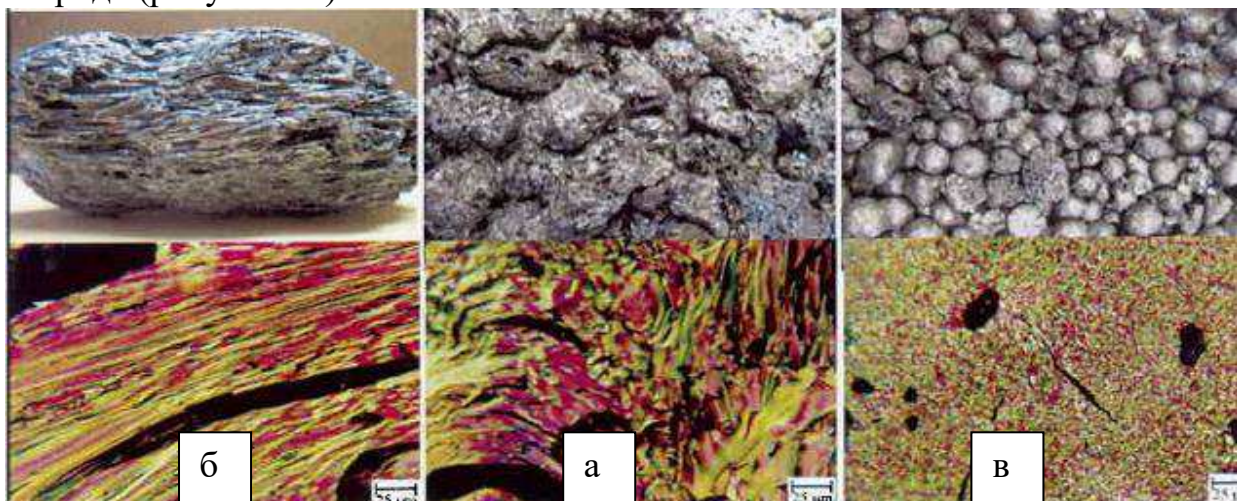
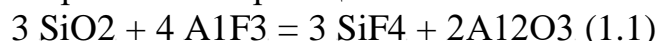


Рисунок 4 – структура кокса: а - губчатый кокс(Sponge Coke), б - игольчатый кокс, в - шот-кокс

Более легкие остатки каталитического крекинга, которые содержат минимум асфальтенов, не содержат металлических загрязнений, но кокс на их основе имеет низкую объемную плотность и анизотропную структуру. Их название - игольчатый кокс – (рисунок 4.б), он малопригоден для производства анодов (высокая пористость, слабая структурная прочность). В нижней части коксования может образовываться так называемый шот-кокс – (рисунок 4.в), у него специфическая зернистая оплавленная изотропная структура, его образование связано с высоким содержанием асфальтенов. Правильно выбранный и контролируемый процесс производства кокса позволяет обеспечить алюминиевую промышленность коксом необходимого качества таблица 2. [12]. Как мы видим из таблицы 2, содержание в коксе золы и серы должно быть минимальным, так как химические элементы, из которых состоит зола, при электролизе криолитоглиноземных расплавов переходят в металл и

ухудшают его качество. Состав золы прокаленных пековых и нефтяных коксов лежит в широких пределах, %: 4-24 SiO<sub>2</sub>; 8-30 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 5-15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 6-12 CaO; 3-8 MgO; 2-18 Na<sub>2</sub>O; 0,03-0,16 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 1,0-17 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 1,5-3,0 SO<sub>2</sub>.

Наиболее вредными примесями при электролизе алюминия являются: ванадий, железо, кремний и никель. Оксиды этих металлов являются основой остатков коксовой золы. Напряжение разложения этих оксидов ниже, чем у оксида алюминия, и они полностью внедряются в алюминий. Кроме того, SiO<sub>2</sub> может взаимодействовать с фторным электролитом по реакции:



Соединение SiF<sub>4</sub> является летучим, что приводит к потере фтора. Влияние серных примесей также вредно. Во время анодного процесса сера окисляется до диоксида серы, который активно взаимодействует с железом металлических конструкций электролизера (секции сбора газа, стальные штифты, ниппели держателей анода и т. Д.). Получающаяся в результате окалина попадает в электролит, а затем уходит в электролитический алюминий в виде примеси железа. При регенерации фторидных солей из газов, выходящих из электролизера, сера накапливается в содовых растворах очистки влажных газов в виде сульфатов, и для их удаления из процесса требуются дополнительные затраты. Ванадий является серным компаньоном, который при преобразовании в металл снижает электропроводность Al и снижает возможность его применения в электротехнической промышленности. Для удаления ванадия соединения бора вводят в алюминиевые электролизеры, которые образуют летучие соединения с ванадием. Столь обширный ряд требований и ограничений, касающихся качества электродных коксов, вызывает необходимость классифицировать их с позиции пригодности для использования в производстве анодной массы и анодов. Такая классификация представлена в таблице 3.

Таблица 2 - Показатели качества кокса и их влияние на технологию производства алюминия

Свойства кокса регламентируемые в мировой практике	Единицы	Типичные значения	Влияние на электролиз			
			Чистота металла	Расход углерода	Выход по току	Эколог ия
Зелёный кокс						
Влажность	%	5-12	-	-	-	-
Летучие	%	8-12	-	+	-	+
Обмасливающий агент	%	0,1-0,3	-	-	-	+

Окончание таблицы 2

Свойства кокса регламентируемые в мировой практике	Единицы	Типичные значения	Влияние на электролиз			
			Чистота металла	Расход углерода	Выход по току	Экология
<b>Фракционный состав</b>						
+8мм	%	10-20	-	-	-	-
От +8мм до +4мм	%	15-25	-	+	-	-
От +4мм до +2мм		15-25	-	+	-	-
От +2мм до +1мм		10-20	-	+	-	-
<b>Прокалённый кокс</b>						
<u>Вибронасыпная</u> плотность фракции (ВНП), +1 - +2мм	<u>кг/дм<sup>3</sup></u>	0,78-0,86	-	+	-	+
Удельное электросопротивление (УЭС)	<u>мкОм·м</u>	460-540	-	-	+	-
Действительная плотность	<u>кг/дм<sup>3</sup></u>	2,05-2,13	-	+	-	-
Реакционная способность в CO <sub>2</sub>	%	3-15	-	+	+	-
Реакционная способность в воздухе	% мин	0,05-0,3	-	+	-	-
Размер кристалла	А	25-32	-	+	+	-
Содержание золы	%	0,1-0,2	+	+	+	-
<b>Примеси</b>						
S	%	0,5-3,5	+	-	-	+
Si	<u>ppm</u>	50-250	+			
Fe	<u>ppm</u>	50-400	+			
Na	<u>ppm</u>	30-120		+		
Ca	<u>ppm</u>	20-100		+		

Она основана не только на детальном исследовании различных видов коксов, но и на многолетнем опыте их промышленного применения в алюминиевом производстве. В данной таблице кокс разделен на четыре группы [1]. Коксы I группы, относящиеся к материалам с анизотропной микроструктурой, малопригодны для анодного производства в силу неудовлетворительных физических характеристик зерен кокса, о чем упоминалось выше. Аноды, как обожженные, так и самообжигающиеся, не выдерживают термических напряжений, возникающих при обжиге и эксплуатации, и дают общий отрицательный результат.

Таблица 3 - Классификация кокса [1]

Показатель	Группы кокса			
	I	II	III	IV
Сырье для коксования	Тяжелые остатки парафинистых нефтей, дистиллятные продукты и их крекинг-остатки	Вакуум остатки тяжелых нефтей, высокоасфальтеновые продукты и их крекинг-остатки	Каменноугольные высоко-температурные пеки с нормальной и низкой степенью пролизованности	Высокопиролизованые каменноугольные пеки и нефтяные остатки
Тип кристаллической структуры и микроструктуры	Игольчатая и волокнистая анизотропная	Губчатый кокс со смешанной изотропной и анизотропной структурой	Слоистая с вкраплениями изотропного углерода	Аморфная, полностью изотропная. Шот-кокс
Пикнометрическая плотность (1300 °F — 5 ч), г/см <sup>3</sup>	2,10-2,13	2,08-2,10	2,03-2,05	2,00-2,02 (пеков) 2,04-2,06 (нефтян.)
УЭС, мкОм-м	520-580	530-605	515-570	550-630
Индекс Хардгроува	>80	70-80	30-50	20-30
Коэффициент линейного термического расширения (КТР)	<2,5	3,0-5,2	5,0-6,0	5,8-7,4
Рекомендации по использованию	Не рекомендуется для анодной массы и обожженных анодов	Рекомендуется для анодной массы самообжигающихся анодов и обожженных анодов	Рекомендуется для анодной массы самообжигающихся анодов	Не рекомендуется для анодной массы и обожженных анодов

Не пригодны в чистом виде для анодного производства и коксы IV группы, как нефтяного, так каменноугольного происхождения в силу высокой пиролизованности каменноугольных смол, нефтяных пиролизных остатков «жесткого» режима пиролиза. Коэффициент линейного термического (КТР), расширения коксов из этих базовых продуктов достигает  $(6-7,5) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , что приводит к разрыву связей на границе кокс наполнителя — и кокс связующего приводит к дефектам и разрушению анода. К этой же группе относится шот-кокс о котором говорили выше. Этот кокс имеет структуру мелкозернистых гранул размером 2-6 мм, покрытых плотной как стекло, оболочкой. Внутри гранулята находится аморфная плотная структура со следами усыхающих микротрещин, которые возникают во время коксования.

Свойства шот-кокса уникальны. Оболочка в силу своей инертной поверхности плохо взаимодействует при смешивании со связующим, а спекаясь с коксом, не образует общей структуры. В электролизёре шот-кокс провоцирует разрушение анода с ростом угольной пены.

[Изъято 54 страницы].

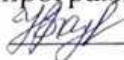
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук

 Н.В. Белоусова

« 10 » 07 2020 г

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

Повышение надёжности комплексов получения прокалённого кокса

с применением современных материалов и технологий

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель/

руководитель

  
подпись, дата

к. т. н., доцент

должность, ученая степень

А.И. Рюмин

инициалы, фамилия

Выпускник

  
подпись, дата

А.Г. Гринкевич

инициалы, фамилия

Рецензент

  
подпись, дата


директор ДАМ «РУСАЛ Братск»

должность, ученая степень

Я.В. Гудов

инициалы, фамилия

Консультант экономического  
раздела

  
к. э. н., доцент

подпись, дата 07 07 2020

Т.В. Твердохлебова

инициалы, фамилия

Красноярск 2020