

УДК 669.713.7

Electrical Resistance Preheating of High-Amperage Cells

Ilya I. Puzanov*,
Andrey V. Zavadyak, Yaroslav A. Tretiyakov,
Mikhail M. Morozov, Anatoliy A. Gubin,
Vitaliy V. Platonov and Aleksandr V. Darkin
RUSAL ETC Ltd, RUSAL,
37/1 Pogranichnikov Str., Krasnoyarsk, 660111, Russia

Received 12.03.2014, received in revised form 07.06.2014, accepted 11.08.2014

At present, there is no single opinion on which cell preheating method is best. In most cases, such a method (that is to be chosen for a smelter) is chosen based on a number of objective and subjective factors. It is often when a method is chosen that power expenses (either electricity or power generated from fuel combustion) for such a method are not taken into account. However, it can play a crucial role for different regions and influence the production cost of Al. This paper discusses the results of testing the method of electrical preheating in a pilot cell area (RA-400 cells) at OJSC RUSAL Sayanogorsk.

Keywords: RA-400 high-amperage cell, electrical preheating, technology development and technology management, experiment performance.

Выбор способа и типа оборудования для обжига электролизера зависит от многих факторов, таких как материал катодных блоков, тип подовой массы, исторически сложившиеся условия на производственной площадке.

Соответственно, выбор метода обжига и тип оборудования должны исходить от желания создать максимально благоприятные условия для проведения операции по приведению электролизера в состояние, близкое к эксплуатационному с минимальным риском разрушения материала подины и досрочного выхода электролизера в капитальный ремонт.

В связи со сложившейся неблагоприятной конъюнктурой цены на алюминий-сырец достигли практически той границы, когда большинство заводов западного дивизиона компании оказались за чертой рентабельности. Данное обстоятельство вынуждает следовать по пути снижения издержек на всех переделах производства алюминия. Эти меры напрямую сопряжены со снижением себестоимости алюминия.

Мы предлагаем свою концепцию обжига электролизеров, объединяющую собой идеи качественной подготовки электролизера к пуску и снижения затрат (без снижения срока службы электролизера) – отказ от дорогостоящего оборудования (автоматических установок для обжига) при производстве капитального ремонта электролизеров типа РА– 400.

Если рассматривать стадию обжига электролизеров в аспекте общей диаграммы распределения зон ответственности, то на долю обжига и пуска приходится около 25 % от общей доли участия каждого обстоятельства, влияющего на срок службы электролизера.

Особенно важно понимать, что от качества проведения обжига электролизеров просматривается прямая зависимость таких экономических показателей, как увеличение межремонтного периода и увеличение срока службы электролизеров, что, в свою очередь, вносит вклад в снижение себестоимости выпускаемой продукции.

Целью любого типа обжига является приведение электролизера в состояние, близкое к эксплуатационному, для минимизации разрушений, происходящих в момент пуска от термического шока в результате заливки электролита.

Общие требования к состоянию электролизера перед пуском:

- наиболее «мягкий» переход от температуры подины электролизера, близкой к температуре внешней среды, к состоянию подины, близкой к эксплуатационным температурам электролизера, с уменьшением образования зон (градиент исключить невозможно) температурных градиентов;
- минимизация зон возможных «термических» шоков, образующихся в результате заливки электролита или при демонтаже технологического оборудования, особенно важно сохранить на данном этапе целостность укрытия;
- за счет оптимального прогрева всей массы футеровки и наиболее равномерного прогрева всей площади футеровки добиться минимизации создания зон термического давления на подину катода как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении;
- плавный и постепенный обжиг подовой массы с целью достижения максимальной монолитности и однородности угольной части подины и обеспечения герметизации межблочных и периферийных швов;
- просушка и удаление жидкостей, привнесенных в катодное устройство в момент монтажа футеровки и содержащихся в самих футеровочных материалах.

В общемировой практике используют несколько относительно дешевых и достаточно технологичных методов обжига электролизеров, различных по принципам приведения тепла к поверхности подины катодного устройства.

Вот некоторые из них:

1. Обжиг за счет выделения тепла при прохождении электрического тока через слой графитовой или коксовой крупки:

- в зависимости от примененных типов катодных блоков (содержание графита 100 %, содержание графита не менее 30 %, аморфные подовые блоки) технология обжига имеет некоторые особенности;
- с применением в качестве элементов, выделяющих тепло, таких, как жидкий металл и алюминиевая стружка.

2. Обжиг с применением в качестве носителя тепла газовой среды, выделяющейся в результате сгорания углеводородного топлива (природный газ, мазут, дизтопливо).

Каждый из вышеперечисленных способов имеет ряд своих преимуществ и недостатков.

Избирать ту или иную методику обжига необходимо применительно к исторически сложившейся ситуации, технической оснащенности, а также исходя из имеющейся материальной

возможности, которая напрямую оказывает влияние на комплектацию капитального ремонта электролизеров футеровочными материалами соответствующего качества.

Как пример:

- оптимальная комплектация для электролизеров, обжигающихся на графитовой или коксовой крупке, – 100%-ное содержание графита в составе подовых блоков. За счет свойств материала и улучшенной теплопередачи обеспечивается качественный равномерный прогрев и минимизируются риски разрушения катодных блоков в местах наилучшего контакта анодов с подиной;
- снижение качества состава подовых секций, а в частности содержания в них графита, например, до 30 %, или применение при капитальном ремонте аморфных подовых блоков стимулирует применение при обжиге электролизеров газопламенных систем в силу менее радикальной скорости подъема температуры подины и возможности лучше управлять процессом нагрева массива футеровки.

Ретроспективу развития систем, методик и оборудования обжига можно проследить на примере Саяногорского алюминиевого завода, который до 1995 г. осуществлял обжиг электролизеров по двум различным методикам и различным типом оборудования. На данном предприятии осуществлялся монтаж двух различных типов электролизеров – С-175, С-190 и С-255.

Для приведения электролизера типа С-175 в состояние, близкое к эксплуатационному, было достаточно применить газопламенную установку для обжига. Для обжига подин электролизеров типа С-255 и С-190 был избран способ обжига на коксовой крупке. Суть данного способа заключалась в том, что на подину электролизера накатывался слой из коксовой крупки для создания электросопротивления и за счет выделения Джоулева тепла осуществлялся подъем температуры. Первоначально крепление штанг анодов к анодной ошиновке осуществлялось жестко при помощи штатных зажимов.

С целью оптимизации процесса и с течением времени оборудование, применяемое при обжиге на коксовой крупке, видоизменялось. Были применены независимые гибкие спуски для крепления пары анодов к анодной ошиновке.

Для лучшего влияния на процесс управления обжигом были сконструированы и применены шунты-реостаты различной мощности, включение которых в цепь осуществлялось по мере стабилизации напряжения и показателей температуры.

Критерием отключения или подключения анодов для управления обжигом служил показатель токовой нагрузки и токораспределения. В связи с применением различных материалов и сезонным изменением их свойств были введены поправочные коэффициенты перерасчета в летнее и зимнее время.

Нет необходимости говорить, что управление обжигом электролизера должен производить персонал высшей квалификации, именно поэтому были выделены бригады узкой направленности, специализировавшиеся на обжиге и пуске электролизеров.

С течением времени и с развитием автоматизированных систем газопламенного обжига на Саяногорском алюминиевом заводе получили развитие и применение такие системы, как «Hotwork», предназначенные для ввода в эксплуатацию стационарного металлургического оборудования. Данная система представляет собой комплекс электронной системы управления, систему топливоподачи и систему сжигания топлива. Система обжига «Hotwork» обла-

дает блоком памяти в ретроспективе и возможностью сделать обзор качества произведенных операций. На период программирования работы газопламенной установки вмешательство оператора не требуется, тем самым практически исключается влияние человеческого фактора на операцию. Основным слабым местом конструктива данной установки является способность ее работы в магнитном поле с напряженностью магнитного поля не более 50 Гс.

Стратегией для достижения цели обжига служит скорость подъема температуры на протяжении всего процесса обжига, достижение необходимой температуры и ее фиксация в течение нескольких часов на пике достигнутой температуры.

За основу управления процессом взяты показания с контрольно-управляющих термопар, измеряющих температуру газовой среды (ГВС).

В местах контрольных точек измерения температуры устанавливаются контактные контрольно-измерительные термопары для снятия показаний температуры на поверхности подины и для определения степени готовности углеграфитовой части футеровки электролизера к моменту заливки электролита.

В настоящий момент все электролизеры Саяногорского алюминиевого завода обжигаются при помощи газопламенных установок. С момента испытания технологии электролизеров РА-300 на Хакасском алюминиевом заводе, ее отладки и по сегодняшний день схематично процесс обжига и пуска выглядит следующим образом:

Выставка анодного массива → монтаж укрытий и газопламенного оборудования в корпусе → обжиг при помощи газопламенной установки → демонтаж установки обжига → заливка электролита → включение электролизера в цепь без снятия нагрузки серии → приведение электролизера к целевым эксплуатационным параметрам.

Исходя из опыта, полученного при газопламенном обжиге электролизеров типа РА-400, отмечено, что для более глубокого прогрева футеровки и достижения высоких значений температур время обжига необходимо увеличивать с 72 до 96 ч. С точки зрения технолога это самый оптимальный вариант для степени прогрева футеровки, но терять недополученный металл, а соответственно, и прибыль – это непозволительная роскошь с точки зрения экономиста, тем более на предприятии с уже отработанной технологией и пущенным в действие производством.

На вновь запускаемом производстве есть возможность произвести запуск серии на полной силе тока, не теряя средств на приобретение или перемещение оборудования для обжига, снизить операционные затраты (переход обжига в пуск), потребление электроэнергии в пусковой и послепусковой период за счет более высокой степени прогрева, влияние на экологическую среду за счет отказа от сжигания углеводородного топлива.

Полученный опыт при вводе в эксплуатацию электролизеров опытного участка электролизеров РА-400 показал, что проводимый газопламенный обжиг в холодный период года не удовлетворяет требованиям технологии (для достижения минимально требуемой температуры подины продолжительность обжига приходилось увеличивать). Данный факт является неприемлемым для быстрого ввода в эксплуатацию Тайшетского алюминиевого завода, т.к. согласно климатическим параметрам город Тайшет (Иркутская область, Россия) семь месяцев в году имеет отрицательную среднемесячную температуру окружающей среды. Также основным условием для подключения электролизеров на Тайшетском алюминиевом заводе

с учетом его мощности для исключения больших нагрузок на энергосистему Сибири является включение электролизера РА-400 в цепь без отключения технологической нагрузки на серии.

Основным техническим решением, позволяющим исключить вышеперечисленные недостатки, служит замена газопламенного обжига электролизеров на обжиг электрическим током.

Применение технологии электрического обжига позволит:

- гарантированно включить электролизер в цепь без отключения или снижения электрического тока серии;
- исключить затраты на дорогостоящее оборудование для обжига и топливо (исключением лимитирующего фактора для быстрого запуска завода и экологической нагрузки на окружающую среду);
- снизить время обжига электролизеров.

Для отработки технических решений по проведению электрического обжига в рамках проекта НИОКР «Создание технологии РА-400» в 2012 г. проведены испытания на двух электролизерах опытного участка РА-400 ОАО «РУСАЛ Саяногорск».

Подготовительные операции

За основу гибкого токоподвода «анодная шина – штанга» (ГТ) приняты конструктивные решения, представленные на рис. 1. Основанными техническими требованиями к ГТ были:

- сечение контактов, площадь и усилие прижима обеспечивают плотность тока: для контакт-деталей не более 0,6 А/мм²; для гибких проводников не более 1,2 А/мм²;
- габаритные и присоединительные размеры создают беспрепятственный монтаж и отключение ГТ;
- размеры и шаг резьбы гаек унифицированы, винты имеют конструкцию, позволяющую использовать крановый механизм для закручивания анодных замков.

Для проведения непрерывных измерений температуры подины в 39 точках (измерение между каждым анодом в трех точках) использовано оборудование:

- термопары марки СПА-К-3.1-И-1250/2000/3000;
- модули ввода сигналов от термопар СПА-МВА-8;
- ПО «Система мониторинга температуры подины».

Для выполнения расчетов температурных полей и напряженно-деформированного состояния катодного устройства при электрическом обжиге электролизера РА-400 специалисты ООО «Научно-технический центр ЭЛТЕР» провели исследование электрического сопротивления коксовой и графитовой крупки различных производителей.

На основании измеренных свойств графитового материала проведено математическое моделирование процесса обжига электролизера. При моделировании рассчитывали электрическое и температурное поле. Ввиду симметричности конструкции и экономии машинного времени в программном пакете ANSYS 14.5 создана модель ¼ части электролизера РА-400. По результатам расчетов на созданной модели подбирали материал и оптимальные параметры геометрии накатанного слоя графитового материала, температурные режимы.

На основании проведенных измерений и расчетов определено, что оптимальным материалом, при котором достигаются целевые параметры обжига электролизера РА-400 без приме-

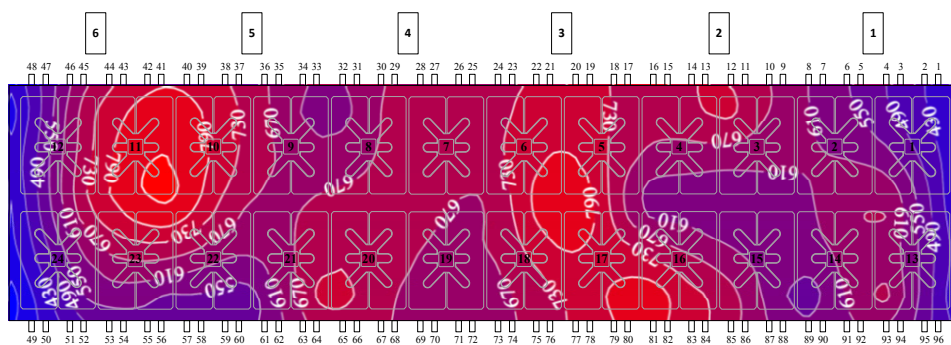


Рис. 1. Температура поверхности подины электролизера №018 перед пуском

нения шунтов-реостатов на полной силе тока, является графитовый материал марки МУ-99 производства ЗАО «ЭНЕРГОПРОМ-Новосибирский электродный завод».

Электрический обжиг электролизера № 018

Согласно утвержденному календарному графику капитального ремонта и программе промышленных испытаний электролизер № 018 подключен на электрический обжиг 10.09.2012, общее время продолжительности электрического обжига составило 58 ч. Ниже представлена последовательность выполнения технологических операций по установке электролизера № 018 на электрический обжиг:

- накатка графитового материала на подину, установка анодов;
- укрытие анодного массива сырьем;
- монтаж оборудования для измерения температуры подины;
- монтаж гибких контактов;
- подключение электролизера со снижением нагрузки на серии до 0 кА;
- управление обжигом и пуском электролизера.

Электролизер № 018 подключен на электрический обжиг с отключением тока серии до 0 кА. Подъем силы тока производился следующим образом (выдержка между ступенями 1-2 мин):

- повышение до 50 кА;
- повышение до 130 кА;
- повышение до 170 кА;
- повышение до 310 кА;
- повышение до 395 кА (база).

На всех этапах повышения силы тока искрений аномальных явлений на электролизере не наблюдалось. Начальное максимальное напряжение составило 2,626 В (вариант измерения напряжения при капремонте). Через 15 мин после подключения электролизера на обжиг измерение напряжения было переведено на рабочий вариант.

Среднее напряжение за период обжига с учетом повышения напряжения, связанного с управлением (отключение анодов), составило 1,9 В, по мере нагрева подины напряжение снижалось. Расход электроэнергии на нагрев подины электролизера составил ~ 44 МВт×ч.

За весь период обжига для управления равномерным нагревом подины отключали 12 анодов (один раз – два анода одновременно) в соответствии с критериями отключения анодов. Основными критериями отключения анодов являлись:

- аномально высокая нагрузка на аноде (более 20 кА);
- высокий градиент температуры между соседними термопарами или локальный перегрев (разница температуры между соседними термопарами более 100 °С).

На рисунке 1 представлено температурное поле подины перед пуском электролизера № 018, через 58 ч после начала обжига.

На рисунке 1 видно, что наблюдаются три района с локальными перегревами подины более 790 °С (между 10 и 11-м анодами, посередине в районе 3-го стояка, между 16 и 17-м анодами), ~ 33 % поверхности подины под анодным массивом нагрета до температуры 700 °С и более. Максимальная температура составила 912 °С (термопара, расположенная между 10 и 11-м анодами), минимальная температура без учета торцевых термопар 506 °С (термопара, расположенная между 14 и 15-м анодами). Градиент более 120 °С наблюдается между 15 термопарами.

Пуск электролизера № 018 осуществлен 13.09.2012 (начало заливки первого ковша электролита считалось началом пуска). Ниже представлена последовательность выполнения технологических операций при пуске:

- протяжка анодных замков, отключение гибких контактов;
- заливка электролита, подъем анодного массива;
- приведение электролизера к нормальному технологическому ходу.

Перед началом протяжки анодных замков для обеспечения рабочего контакта шина – штанга напряжение составляло 1,63 В, после – 1,72 В. Максимальный анодный эффект после заливки электролита равен ~ 26 В.

После заливки электролита и протапливания пускового сырья с электролизера сняты три ящика угольной пены (с учетом количества графита в «подушке» должно быть не менее 20 шт.). В течение последующих суток на электролизере произошло разрушение биметаллических пластин на пяти анодах. Главным образом разрушение произошло из-за замыкания всплывшего с подины прилипшего графитового материала (оставшийся графитовый материал устранялся путем индивидуального подъема анода и удаления его с поверхности анода и подины скребком).

Электрический обжиг электролизера № 021

Согласно утвержденному календарному графику капитального ремонта электролизера № 021 подключен на электрический обжиг 02.10.2012, общее время продолжительности электрического обжига составило 72 ч 50 мин.

Монтаж вспомогательного оборудования, укрытие анодного массива осуществлены так же, как и на электролизере № 018. На основании полученного опыта обжига электролизера № 018 отличительной особенностью электрического обжига электролизера № 021 явились:

- измененная геометрия графитовой «подушки». Графитовый материал накатывался на подину с помощью деревянной рамки;

- подключение электролизера на обжиг на силе тока 200 кА с применением комбинированного способа шунтирования (шунтирование с помощью контактно-болтовой и клиновой системы);
- увеличение время проведения обжига до 72 ч.

Пуск электролизера № 021 осуществлен 05.10.2012. Перед началом протяжки анодных замков для обеспечения рабочего контакта шина – штанга напряжение составляло 1,6 В, после – 1,72 В. Максимальный анодный эффект после заливки электролита ~ 18 В.

Во время заливки электролита и подъема анодного массива произошло разрушение анодов № 7, 8, 9, 10 (анодные блоки раскололись на большие куски). Причиной разрушения анодов послужил их неравномерный перегрев, о чем свидетельствует перегрев подины в районе указанных анодов. В течение следующих суток после пуска постоянный мониторинг токораспределения по анодам, подъем анодов над поверхностью расплава и удаление скребком графитового материала с подошвы анода и подины позволили избежать проблем, возникших в этот же период на электролизере № 018. Однако после заливки металла на электролизере возникла МГД-нестабильность. Основной причиной МГД-нестабильности явилось неравномерное распределение тока по анодам из-за проводимых работ с анодным массивом в период обжига (работа с аварийными анодами на пуске, зажатие рабочих контактных узлов анодов перед пуском, учитывая их положение по уровню подошвы только по анодному фланцу). После установки всех анодов в горизонт с помощью крючка МГД-нестабильность прекратилась.

Выводы

Приемлемый электрический обжиг электролизеров РА-400 на графитовом материале без применения шунтов реостатов на силе тока 395 кА возможен. Расчеты плановой калькуляции проведения обжига в условиях бизнес-плана на 2013 г. показали, что проведение электрического обжига на ~ 5 % дешевле, чем проведение газопламенного обжига.

Для повышения равномерности распределения тока по анодам и снижения случаев регулирования температуры отключением анодов необходимо доработать контактное соединение «анодная шина – штанга», которое обеспечивало бы свободное перемещение анодной штанги вдоль продольной и поперечной осей электролизера. В данном случае анод «автоматически» под действием собственного веса будет равномерно распределять удельную нагрузку на графитовую крупку, что позволит создавать одинаковую плотность тока по подошвам анодов и поверхности подины, а значит, и температуру прогрева.

Обжиг высокоамперных электролизеров при помощи электросопротивления

**И.И. Пузанов, А.В. Завадык,
Я.А. Третьяков, М.М. Морозов,
А.А. Губин, В.В. Платонов, А.В. Даркин**
ООО «РУСАЛ ИТЦ»

Россия, 660111, Красноярск, ул. Пограничников, 37, стр. 1

На текущий момент нет единого мнения о том, какой способ обжига лучше. В большинстве случаев выбор того или иного способа на каждом алюминиевом заводе определяется рядом объективных и субъективных факторов. Зачастую при выборе способа обжига не учитываются затраты на использование энергии на этот процесс (электрической или от сжигания эквивалентного количества различных видов топлива), что может иметь существенное значение для различных регионов и влиять на себестоимость выпускаемого алюминия. В данной статье представлены результаты испытаний электрического обжига электролизеров опытного участка РА-400 ОАО «РУСАЛ Саяногорск».

Ключевые слова: высокоамперный электролизер РА-400, электрический обжиг, разработка и управление технологии, проведение эксперимента.
