

УДК 669.71

Представлені результати аналітичного дослідження з контролю параметрів і прогнозування технологічних відхилень в алюмінієвих електролізерах з метою зниження енергоємності виробництва алюмінію. Обговорюються технологічні параметри, що дозволяють підвищити ефективність управління процесом електролізу та прогнозу технологічних відхилень у ванні. Показано, що постійне вимірювання додаткових технологічних параметрів на електролізері дозволяє прогнозувати настання технологічних відхилень

Ключові слова: алюмінієвий електролізер, струм, електроліт, напруга, анодний ефект, МГД-нестабільність

Представлены результаты аналитического исследования по контролю параметров и прогнозирования технологических отклонений в алюминиевых электролизерах с целью снижения энергоёмкости производства алюминия. Обсуждаются технологические параметры, позволяющие повысить эффективность управления процессом электролиза и прогноза технологических отклонений в ванне. Показано, что постоянное измерение дополнительных технологических параметров на электролизере позволяет прогнозировать наступление технологических отклонений

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, ток, электролит, напряжение, анодный эффект, МГД-нестабильность

АНОДНЫЙ ЭФФЕКТ И МГД-НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В АЛЮМИНИЕВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИХ ПРОГНОЗА

Г. И. Щербань
Аспирант*

E-mail: qgi@mail.ru

И. Ф. Червоный

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: rot44@yandex.ru

*Кафедра металлургии цветных металлов
Запорожская государственная
инженерная академия
пр. Ленина 226, г. Запорожье, Украина, 69006

1. Введение

Основной стратегией современных алюминиевых предприятий является ведение процесса электролиза без технологических отклонений, которые снижают технико-экономические показатели производства. Сложность управляемости процесса электролиза алюминия и снижения числа отклонений в электролизере связана с проблемами технологической диагностики [1]. Некоторые параметры, такие как обратная ЭДС или удельное сопротивление электролита, не контролируются из-за отсутствия средств измерений. Такие показатели, как концентрация глинозема в электролите, межполюсное расстояние, температура, криолитовое отношение, уровень металла и электролита регистрируются периодически (1 раз в 1...3 суток) путем ручных измерений. Из-за большой инертности процесса контроля большинства параметров алюминиевый электролизер находится в технологически разбалансированном состоянии [2]. Исследованиям влияния технологических характеристик процесса электролиза посвящено ряд работ [3–6], в которых рассматриваются отдельные элементы технологических режимов. В то же время комплексное решение управляемости процесса остается до конца не решенным.

2. Анализ литературных данных

При производстве алюминия электролизом расплава криолита и растворенного в нем глинозема обязательным технологическим условием является поддержание заданной концентрации глинозема в расплаве. Это обеспечивается постоянной подачей глинозема в расплав криолита. При нарушении подачи глинозема возникает нарушение границы раздела образовавшегося металла и электролита. При недостатке концентрации глинозема возникает так называемый «анодный эффект», который приводит резкому снижению производительности процесса получения металлического алюминия. При этом возникает перегрев электролита, что приводит к потере фтористых солей.

Существующие системы автоматизации только фиксируют проявление тех или иных технологических отклонений. Контроль технологического состояния электролизера и прогноз технологических отклонений по приведенному напряжению за последние десятилетия показали низкую эффективность. На данный момент не существует систем, позволяющих производить достоверную технологическую диагностику ванны и прогнозирование технологических отклонений. Отсутствие достаточно-

го набора измеряемых технологических параметров для оценки текущего состояния ванны обуславливает низкую точность прогноза. Все это приводит к необходимости поиска более совершенных методов диагностики и контроля.

Ранее считалось, что возникновение анодного эффекта (АЭ) имеет свою положительную сторону, т. к. сигнализирует об истощении глинозема в электролите и позволяет косвенно судить о состоянии ванны и очистить электролит от угольной пены [7]. В настоящее время отрицательные свойства перекрывают положительные стороны, и усилия направлены на ограничение числа анодных эффектов (АЭ). На некоторых заводах достигается снижение количества АЭ до 0,03 ед/сут, что позволяет снизить расход электроэнергии на 150...200 кВт·ч/т Al [8] и улучшить экономические показатели процесса электролиза, но избежать полностью АЭ по-прежнему не удается.

Проявления МГД-нестабильности в электролизере включают в себя статический перекося границы металл-электролит, волнообразование, циркуляцию электролита и металла, в значительной степени определяют процессы тепло- и массопереноса в ванне. С одной стороны, деформация и волнение поверхности металла, значительная конвекция расплава способствуют растворению алюминия в электролите, интенсифицируют протекание обратной реакции – Al с CO₂ и, как следствие, – увеличение межполюсного расстояния. С другой стороны, необходимо выравнивать температурное поле и добиваться однородной концентрации компонентов электролита, что требует развитого течения в ванне [9].

Для устранения отрицательного влияния «анодного эффекта» в работе [2] предлагается повышать качество глинозема с целью более полного его растворения в электролите.

В работе [5] предлагается усилить магнитогидродинамические характеристики электролизера, что обеспечит уменьшить анодно-катодное расстояние и полностью погасить «анодный эффект». Одним из вариантов предлагается изменение конфигурации электролизера для повышения скорости перемешивания расплава в ванне.

Дальнейшим шагом в исследовании процессов в электролизере была попытка создать на основе моделирования виртуального вида ванны электролизера и происходящие в ней процессы [6]. Цифровая обработка модельного процесса позволит, по мнению авторов, визуализировать процессы и использовать полученные результаты при проектировании новых поколений электролизеров.

Однако в отечественных и зарубежных работах не рассматриваются вопросы непрерывного контроля комплекса параметров процесса, таких как температура электролита, состав и соотношение составляющих анодного газа, отношение плотностей расплава электролита и алюминия, толщина гарнисажа и ряда других характеристик. Исследование взаимодействия комплекса параметров процесса на возникновение и протекание «анодного эффекта» позволит значительно усовершенствовать процесс электролиза и повысить производительность электролизера.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является оптимизация технологического режима электролизера.

В соответствии с поставленной целью была поставлена задача рассмотрения механизмов технологических отклонений в ванне и определения перечня параметров алюминиевого электролизера, контроль которых позволяет прогнозировать приближение наиболее частых технологических отклонений (анодный эффект, МГД – нестабильность) с целью повышения технико-экономических показателей производства алюминия.

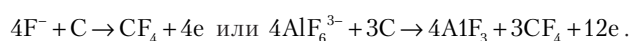
4. Явление анодного эффекта

Электрохимическая природа анодного эффекта имеет ряд неопровержимых доказательств, но, несмотря на многочисленные исследования, природу анодного эффекта нельзя считать окончательно выясненной [9].

По мере уменьшения концентрации глинозема, повышается температура, уменьшается вязкость электролита, снижается разность плотностей электролита и расплавленного алюминия, что подразумевает уменьшение энергетических затрат на выход газов из под анода. В таких условиях газовые пузырьки образуются гораздо большего размера, чем газовые пузырьки, образуемые при больших значениях концентрации глинозема. Повышение температуры и более длительное пребывание анодных газов в соприкосновении с углем приводит к изменению состава газов; содержание углекислого газа сразу, скачком, понижается до 20...30 %, содержание окиси углерода повышается до 40...50 %, CF₄ повышается до 20 % [9]. Это способствует выделению фтора из электролита, образующего диэлектрическую пленку из перфторуглеродов, изменяя смачиваемость таким образом, поверхности подошвы анода, и отходящие газы начинают скапливаться под анодом [10].

В ходе химической реакции, увеличивается величина ЭДС и снижается сопротивление электролита. Термодинамические расчеты показывают, что напряжение ЭДС в этом случае оказывается равным 2,2 В, что совпадает с ЭДС, измеренной на промышленных ваннах в момент наступления анодного эффекта [9]. Рабочее напряжение, когда обратная ЭДС имеет нелинейную зависимость от удельного сопротивления электролита (рис. 1), в условиях переменного межполюсного расстояния, может оставаться практически неизменным, т. к. увеличение напряжения обратной ЭДС может нивелироваться за счет снижения величины удельного сопротивления и соответственно падения напряжения в электролите.

Плотность тока на свободной поверхности сильно увеличивается, потенциал анода становится все более положительным и пассивируется до потенциала, достаточного для разряда фторсодержащих ионов, вместе с ионами кислорода на аноде начинают разряжаться ионы фтора, концентрация перфторуглеродов возрастает до 30 %. [10]



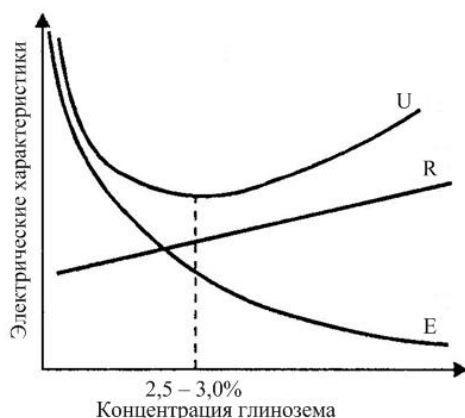
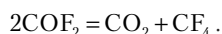


Рис. 1. Зависимость напряжения — U , сопротивления — R и обратной ЭДС — E от концентрации глинозема [8]

Поскольку средняя величина тока серии практически неизменная, это вызывает перераспределение тока с его концентрацией под анодом в местах наименьшего сопротивления газовой пленки с локальным увеличением плотности тока и падения напряжения [11]. Наличие у поверхности анода фторсодержащих соединений провоцирует дальнейшее развитие пассивации. При достижении перфторуглеродами определенной концентрации в объеме образующихся анодных газов, начинается процесс поглощения перфторуглеродами кислорода с образованием COF_2 , который распадается только при высоких температурах по реакции [10]



Выделение CF_4 происходит в течении всего АЭ, в то же время, выделение C_2F_6 начинается вместе с АЭ и заканчивается через 1...2 мин [12].

Несмотря на линейную зависимость растворимости кислорода в перфторуглеродах, реакция поглощения представляет собой лавинообразный процесс, поскольку перфторуглероды поглощая кислород, провоцируют дальнейшее образование ионов фтора, которые образуют с углеродом анода дополнительное количество перфторуглеродов. Образование перфторуглеродов изолирует большую часть поверхности подошвы анода и увеличивает переходное сопротивление между электролитом и анодом, что приводит к резкому повышению напряжения. В этих условиях ток проходит через газовую пленку за счет искрового, а также тлеющего разрядов [13]. Это вызывает увеличение тепловой мощности в этой среде, и как следствие резкое локальное увеличение температуры в поверхностном слое электролита, что так же дополнительно стимулирует увеличение образования перфторуглеродов.

5. Природа МГД – нестабильности

Распределение тока в металле зависит от конструктивных (ошиновка, геометрия ванны, конструкция блок-блужа) и технологических (сила тока, высота металла, состояние формы рабочего пространства, осадки) параметров электролизера [14]. Горизонтальные токи в металле направлены от центра ванны к торцам и краю

настыли, а величина тока, направленного от бортов к границе настыли, больше тока, протекающего в центре.

Взаимодействие магнитного поля с током проявляется не только в перекосе поверхности расплавленного металла. Исследования магнитогидродинамических процессов в электролизере показали, что поверхность расплавленного металла находится в состоянии непрерывного волнения и при этом высота волн может достигать 45 мм. Таким образом, высота волны сравнима с величиной межполюсного расстояния, что приводит к местным коротким замыканиям.

Высокая скорость циркуляции металла обеспечивает активный перенос глинозема в электролите и по подине, обеспечивая рост и таяние настыли, перемещение осадка, образование коржей на подине [15].

У разных авторов частоты волнения при МГД-нестабильности разнятся: от 0,07 до 0,05 Гц, а полосы частот от 0,1 до 1,2 Гц [16–20]. Это связано с тем, что частоты и амплитуды волнений поверхности металла индивидуальны для каждого электролизера и зависят от целого ряда различных факторов: конструкции электролизера и ошиновки, величины тока и его распределения, геометрии формы рабочего пространства, концентрации глинозема и т. д.

6. Анализ влияния комплексности технологических параметров на прогнозирование работы электролизера

Ключом к решению вопроса по сокращению технологических отклонений является совершенствование технологии контроля и управления электролизером, которая непосредственно влияет на технико-экономические характеристики производства и требует модернизации, как в методическом плане, так и в плане аппаратной реализации.

Существующие системы контроля технологического состояния ванны ориентированы на отслеживание лишь одного из многих технологических параметров электролизера, в частности приведенного напряжения. Это ведет к получению односторонней и далеко не полной информации о ванне. Для того чтобы свести к минимуму количество технологических отклонений на электролизере, необходимо организовать непрерывный мониторинг нескольких параметров, характеризующих текущее состояние и развитие отклонений в ванне:

1. Температура электролита и его перегрева;
2. Концентрация глинозема;
3. Состав анодного газа и отношение CF_4 , CO , CO_2 входящих газов;
4. Обратная ЭДС и удельное электрическое сопротивление электролита;
5. Межполюсное расстояние, высота металла и электролита;
6. Отношение плотностей расплава электролита и алюминия;
7. Толщина гарнисажа;
8. Эффективная плотность тока и ее распределение под подошвой анода;
9. Распределение силы тока и магнитного поля в подине;
10. Изменения формы рабочего пространства.

Анализ перечисленных параметров показал следующее. Постоянный контроль температуры элект-

тролита и его перегрева (п. 1), а также концентрации глинозема (п. 2) не возможен из-за агрессивности среды измерения. Контроль состава анодного газа (п. 3) дает возможность прогнозировать наступление анодного эффекта, но его состав не обязательно представляет условия, существующие в каком-либо месте электролизера. К тому же, основной проблемой при реализации газоаналитических систем является постепенное зарастание газосборных трубопроводов и газоаналитических датчиков продуктами сгорания и конденсирующимися смолистыми отложениями, а также сложность обеспечения газоанализаторами всего парка электролизеров.

Остальные параметры (пункты 4..6) нелинейно связаны с температурой электролита и концентрацией глинозема, их количество является минимально достаточным для прогнозирования технологических отклонений. В настоящее время разработаны основные положения ведения постоянных измерений дополнительных параметров при электролизе алюминия совокупными и косвенными методами в условиях агрессивной среды и невозможности проведения прямых измерений. Внедрение новых средств контроля не измеряемых ранее технологических параметров алюминиевого электролизера, позволит контролировать текущее состояние алюминиевого электролизера и прогнозировать анодные эффекты и состояние МГД-нестабильности.

7. Выводы

В данной работе показана целесообразность непрерывного контроля комплекса параметров процесса для прогнозирования технологических отклонений при электролитическом получении алюминия.

Определено, что оптимальное количество технологических параметров, измерение которых является достаточным для автоматического прогнозирования технологических отклонений, включает следующее:

- температура электролита и его перегрева;
- концентрация глинозема;
- состав анодного газа и отношение CF_4 , CO , CO_2 в отходящих газах;
- обратная ЭДС и удельное сопротивление электролита;
- межполюсное расстояние, высота металла и электролита;
- отношение плотностей расплава электролита и алюминия;
- толщина гарнисажа;
- эффективная плотность тока и ее распределение под подошвой анода;
- распределение силы тока и магнитного поля в подине;
- изменения формы рабочего пространства.

Литература

1. Grotheim, K. Aluminium electrolysis [Text] / K. Grotheim and others. – Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 1982. – 271 p.
2. Бажин, В. Ю. Управление анодным эффектом на алюминиевом электролизере [Электронный ресурс] / В. Ю. Бажин, А. А. Власов, А. В. Лупенков // *Металлург*. – 2011. – № 5. – С. 89–93. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/579151/>
3. Thonstad, J. Anode effects in aluminum electrolysis cells and ways of reducing their frequency [Text] / J. Thonstad // *Aluminum Siberia-2006: Proc. Int. Conf.-Exhibition, Verso, Krasnoyarsk, 2006*. – P. 200–213.
4. Prediction of anode effect in aluminium electrolyzing process. Аннотация [Electronic resource] / Available at: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YJZH200805003.htm. – Last access: 20.07.2014
5. A new anode effect quenching procedure [Electronic resource] / Available at: http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/cambio_climatico/oamdl/pdd_aluar_anexo5.pdf. – Last access 19.07.2014.
6. A virtual aluminum reduction cell [Electronic resource] / available at: <http://smse.csu.edu.cn/Bk/Attachments/2e694a5a-16d9-4815-ba74-3ef6af048445/A%20Virtual%20Aluminum%20Reduction%20Cell.pdf>. – Last access 19.07.2014.
7. Уткин, Н. И. *Металлургия цветных металлов* [Текст] / Н. И. Уткин. – М.: *Металлургия*, 1985. – 440 с.
8. Борисоглебский, Ю. В. *Металлургия алюминия* [Текст]: монография / Ю. В. Борисоглебский и др. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 438 с.
9. Баймаков, Ю. В. *Электролиз расплавленных солей* [Текст] / Ю. В. Баймаков, М. М. Ветюков. – М.: *Металлургия*, 1966. – 560 с.
10. Tabereaux, A. T. Maximum Anode Effect Voltage [Text] / A. T. Tabereaux. – *Light Metals*, 2007. – P. 405–410.
11. Солхейм, А. *Распределение анодного тока в алюминиевых электролизёрах* [Текст] : сб. научн. статей / А. Солхейм, Б. П. Мокснес. – *Алюминий Сибири*. – Красноярск, 2007.
12. Tabereaux, A. Anode Effects and PFC Emission Rates [Text] / A. Tabereaux // *Eighth Australasian Aluminium Smelter Techn. Conf. and Workshop*. – Queenstown, New Zealand, 2004. – P. 532–540.
13. Изгарышев, Н. А. *Курс теоретической электрохимии* [Текст] / Н. А. Изгарышев, С. В. Горбачев. – Москва: Госхимиздат, 1951. – 503 с.
14. Альчиков, В. В. Оптимизация магнитных полей от токов в ошиновке алюминиевых электролизеров [Текст] : сб. научн. статей / В. В. Альчиков. – *Алюминий Сибири*. – Красноярск, 2006.
15. Слученков, О. В. Взаимовлияние поля скоростей катодного металла и осадка электролизеров на силу тока 300 кА. Граница раздела металл-электролит [Текст] : сб. научн. статей / О. В. Слученков, П. В. Поляков, С. И. Ахметов, А. Г. Архипов. – *Алюминий Сибири*. – Красноярск, 2008.
16. Радионов, Е. Ю. Особенности магнитной гидродинамики электролизеров ОА-300 5-ой серии Иркутского алюминиевого завода [Текст] / Е. Ю. Радионов, В. А. Ершов // *Вестник Иркутского Государственного Технического Университета*. – 2009. – № 4. – С. 210–213.

17. Книжник, А. В. Исследование МГД-стабильности электролизёра ОА-300 [Текст] : сб. научн. статей / А. В. Книжник, Ю. В. Богданов, А. А. Кузаков, Е. Ю. Радионов. – Аллюминий Сибири. – Красноярск, 2007.
18. Renbijun, A. Research of Fuzzy Control for Alumina in Henan Hongkong Longquan Aluminum Co. LTD., China [Text] / A. Renbijun // Light Metals. – 2007. – Vol. 4. – P. 439–442.
19. Berezin, A. I. Neural Network Qualifier of Noises of Aluminium Reduction Cell [Text] / A. I. Berezin, P. V. Poliakov, O. O. Rodnov // Light Metals. – 2003. – Vol. 4. – P. 437–442.
20. Кирко, И. М. Магнитная гидродинамика: современное видение проблем [Текст] / И. М. Кирко, Г. Е. Кирко. – Москва: Ижевск: Регуляр. и хаот. динамика: Ин-т компьютер. исслед., 2009. – 630 с.

Запропонована підтримка співвідношення виробництва та споживання електричної енергії та теплоти на основі технологічної системи виробництва та споживання біогазу, основу якої складає інтегрована динамічна підсистема з використанням біогазової установки та теплонасосного енергопостачання, когенераційної установки та електроакмулювання. Прийняття рішень на підтримку процесу зброджування, відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжої сировини та електроакмулювання на основі прогнозування зміни параметрів технологічного процесу дозволяє підвищити товарність біогазової установки та знизити собівартість виробництва енергії та шкідливі викиди двоокису вуглецю до 10–15 %

Ключові слова: технологічна система, біогазова установка, теплонасосна система, когенераційна установка, електроакмулювання, прийняття рішень

Предложена технологическая система производства и потребления биогаза, основу которой составляет интегрированная динамическая подсистема с использованием биогазовой установки и теплонасосного энергоснабжения, когенационной установки и электроакмулирования. Принятие решений на поддержание процесса сбразживания, отгрузку сброженного суслу и загрузку свежего материала, электроакмулирования на основе прогнозирования параметров технологического процесса позволяет повысить товарность биогазовой установки и снизить себестоимость производства энергии и вредные выбросы двуокиси углерода до 10–15 %

Ключевые слова: технологическая система, биогазовая установка, теплонасосная система, когенационная система, электроакмулирование, принятие решений

УДК 621.182.2.001.57

ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ВИРОБНИЦТВА ТА СПОЖИВАННЯ БІОГАЗУ

Є. Є. Чайковська

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент
Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1, м. Одеса,
Україна, 65044

E-mail: eechaikovskaya@gmail.com

1. Вступ

В умовах ресурсо та енергозбереження однією з головних переваг когенераційних технологій щодо здобуття як електроенергії, так і теплоти на основі одного первинного джерела енергії є можливість використання біогазу на основі переробки біологічних відходів [1]. Метанове зброджування щодо здобуття біогазу як нетрадиційного джерела енергії потребує спеціальних умов щодо підтримки життєдіяльності складного комплексу мікроорганізмів в анаеробних умовах під дією мікрофлори. Особливого значення набуває виробляюча активність процесів анаеробного зброджування, підтримка якої впливає на якісну та кількісну віддачу метантенка. Більш того, виникає необхідність в забезпеченні товарності біогазової установки при урахуванні втрат енергії в навколишнє середовище,

на підігрів субстрату до температури зброджування та його перемішування. Когенераційні технології, що використовують первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління дозволяють включати до технологічних схем різноманітні енергетичні установки: поршневі двигун, газову турбіну, парову турбіну чи комбінацію парової та газової турбін. Однак, умови когенерації при використанні біогазу ускладнені не тільки незбігом споживання електричної енергії та теплоти, а й непостійним виходом біогазу, що потребує додаткових баків для зброженої сировини, додаткових ємностей газгольдерів, значних витрат теплоти на підтримку процесу зброджування за рахунок виробленої енергії, т.ін. Збитковість же виробництва електроенергії в години найменшого споживання не дозволяє використання когенераційних установок в повній мірі.