

УДК 621.879

Управление и контроль энергорегима электролизеров для производства алюминия *

И.А. Сысоев

Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

Ivansys@istu.irk.ru

Статья поступила 30.08.2014, принята 15.11.2014

В статье дан краткий анализ возможных подходов к регулированию энергетического режима электролизеров и состава электролита. Выполнен обзор литературных источников об управлении энергетическим режимом различных типов конструкций электролизеров. Отмечены достоинства и недостатки разных способов, используемых в мировой практике. Выявлено, что важнейшим фактором, определяющим достижение высоких технико-экономических показателей процесса электролиза алюминия, являются правильно подобранная температура электролита и величина перегрева. На основании изученных материалов автором определены способы разработки малозатратного и эффективного метода управления энергетическим режимом работы электролизера. Выполнены эксперименты по определению формулы для расчета температуры ликвидус электролита. Проведены исследования влияния различных факторов на температурные характеристики электролитов при производстве алюминия. Целью выполненной работы было определение оптимальных параметров и создание алгоритма управления энергетическим режимом электролизеров путем контроля и автоматического поддержания в заданных пределах рабочего напряжения и структуры температур электролита. На основании созданного алгоритма управления была разработана компьютерная программа и проведены ее промышленные испытания на действующем производстве. Результаты работы можно использовать при разработке и внедрении технологии автоматизированного управления электролизеров для получения алюминия.

Ключевые слова: электролизер, алюминий, электролит, температура, напряжение, ток, электроэнергия, управление энергетическим режимом.

Power level management and control for electrolyzers in aluminium production

I.A. Sysoev

Irkutsk State Technical University; 83, Lermontov Str., Irkutsk, Russia

Ivansys@istu.irk.ru

Received 30.08.2014, accepted 15.11.2014

The article analyzes briefly possible approaches to power level control for electrolyzers and an electrolyte composition. A review of literary sources concerning power level management in different construction types of electrolyzers has been carried out. Advantages and disadvantages for various management ways used in the world practice have been pointed out. Both suitable temperature of an electrolyte and its superheat value have been revealed as a major factor determined high technical and economic indexes for aluminium electrolysis. According to the materials learned, some ways for development of a low-cost and effective method of power level management for electrolyzer have been determined by the author of the article. The experiments on the development of the formula for calculating the liquidus temperature of an electrolyte have been carried out. The research of the influence of various factors on the electrolyte thermal response when producing aluminum has been conducted. The work objective is to determine optimal parameters and create an algorithm to control the power level of electrolyzers by monitoring and automated maintaining the operating voltage and the temperature electrolyte structures within the specified limits. On the basis of the control algorithm, a computer programme has been developed and industrial tests of the programme have been carried out on an operating production. The study results can be used in developing and implementing the technology of electrolyzer automated control for aluminium production.

Key words: electrolyzer, aluminum, electrolyte, temperature, voltage, current, electric power, power level control.

* Исследования проведены при поддержке гранта президента Российской Федерации МК-7534.2013.8

Введение. Электролитическое получение алюминия — один из наиболее энергоемких промышленных процессов. Так, например, для получения одной тонны алюминия методом Эру – Холла в зависимости от типа электролизера требуется затратить 13,2–16,0 тыс. кВт×час электроэнергии. На сегодняшний день развитие отечественной алюминиевой промышленности происходит в двух направлениях: модернизация действующего производства и строительство новых заводов, укомплектованных самым передовым оборудованием и отвечающим современным требованиям экологии, безопасности труда и эффективности, таких как Хакасский алюминиевый завод и V серия Иркутского алюминиевого завода. В связи с ужесточением требований к энерго- и ресурсосбережению, актуальными являются исследования по созданию энергосберегающей технологии получения алюминия.

Одной из главных составляющих энергоэффективности процесса электролиза алюминия является правильно подобранная температура электролита и величина перегрева. Перегрев электролита (T_{SH}) определяется разностью между рабочей температурой электролита (T_{EL}) и температурой ликвидус (T_L), или его кристаллизации: $T_{SH} = T_{EL} - T_L$.

Температура электролита и температура ликвидус, определяемая избыточным содержанием фторида алюминия AlF_3 в электролите, влияют на показатель выхода по току электролизера. В отечественной практике электролиза вместо избытка AlF_3 применяют обратный параметр — молекулярное (криолитовое) отношение NaF/AlF_3 (KO). По данным [1], снижение T_{EL} на 1 °C повышает выход по току на 0,19 % для электролизеров с обожженными анодами и на 0,17 % — для электролизеров Содерберга. Повышение избытка AlF_3 в электролите на 1 % (снижение KO примерно на 0,05 ед.) повышает выход по току на 0,56 % для электролизеров с обожженными анодами и на 1,35 % — для электролизеров Содерберга. Определена точка оптимума T_{EL} , при которой достигается максимум выхода по току, равная 950 °C. Величина оптимального избытка AlF_3 не указана.

Повышение избытка AlF_3 в электролите (снижение KO) ограничено возможностями стабилизации теплоэнергетического режима. Показателем, характеризующим стабильность теплоэнергетического режима электролизера, является эффективный перегрев электролита T_{SH} . Температура ликвидуса электролита определяется его химическим составом и, в первую очередь, избытком AlF_3 [2]. Перегрев электролита T_{SH} является важнейшим параметром электролиза, который определяет скорость растворения глинозема в электролите [3], а также влияет также на величину боковых настывлей и, как следствие, на теплообмен электролизера с окружающей средой, так как тепловые потери через боковую настывль составляют около 35 % от всех тепловых потерь электролизера [4].

Обобщая изложенные сведения, можно утверждать, что для получения максимального выхода по току необходимо поддерживать температуру электролита T_{EL} вблизи значения 950 °C и обеспечивать оптимальную величину перегрева электролита T_{SH} в диапазоне 8–12 °C при максимально возможном избытке AlF_3 (минимально возможное KO). Таким образом, стабилизация

структуры температур электролизера является одним из важнейших факторов, определяющих достижение высоких технико-экономических показателей его работы.

В настоящее время в мировой практике для контроля и управления энергетическим режимом электролизера используются разные подходы. Одни основаны на поддержании необходимой величины криолитового отношения, концентрации MgF_2 и CaF_2 [5]. Другие регулируют содержание фтористого алюминия в электролите, используя алгоритм по принципу fuzzy-логики [6].

В компании «Pechiney» для управления энергорежимом электролизера разработано устройство автоматического измерения температуры и уровня электролита [7]. К недостаткам устройства относят налипание электролита на измерительное устройство, что в свою очередь повышает трудозатраты на обслуживание.

За рубежом для управления энергетическим режимом используется программа «9 box» фирмы «Heraeus Electro-Nite». Ключевым моментом алгоритма является определение температуры ликвидус и перегрева с помощью высокоточных одноразовых термодатчиков «Cry-O-Therm». Измерительный комплекс «Cry-O-Therm» фирмы «Heraeus Electro-Nite» считается наиболее достоверным и оперативным способом определения температуры расплава и его температуры плавления. Главным недостатком системы является высокая стоимость термодатчиков [8].

Концепция управления процессом электролиза на основе программы «9 box» базируется на следующих положениях:

- контроль «кислотности» электролита основывается на измерении температуры ликвидус термодатчиками системы «Cry-O-Therm», без определения химического состава электролита. Изменение добавки фтористого алюминия регулируется не по криолитовому отношению, а производится в том случае, когда фактическая температура ликвидус отличается от целевого значения;

- контроль за структурой температур электролита основывается на величине перегрева, а не на рабочей температуре. Рабочая температура изменяется лишь тогда, когда будет определено предельное ее отклонение по отношению к целевому значению. В работе [9] представлен опыт применения вышеуказанной методики управления. Внедрение данной технологии управления, по сообщению авторов, привело к увеличению выхода по току на 1 %, снижению расхода электроэнергии на 0,6 кВт×час/кг Al.

Следует отметить, что основным недостатком данной концепции управления является высокая стоимость одноразовых термодатчиков, что препятствует серийному применению на российских алюминиевых заводах.

В настоящее время на большинстве российских алюминиевых заводов управление энергорежимом сводится к корректировке химического состава электролита с целью поддержания заданного криолитового отношения. На некоторых заводах разрабатывались и внедрялись программы управления на основе сведений о химическом составе электролита и температуры ликвидус. Так, например, известна программа управления, основанная на регулярных измерениях температуры

ликвидус электролита прибором «МИТЭЛИК». За основу алгоритма управления принята концепция применения fuzzy-логики [10]. Недостатками являются невысокий срок службы самих термопар и низкая воспроизводимость измеренных значений температур в сравнении с термопарами «Cry-O-Therm».

Известны случаи, когда для управления энергетическим режимом используется определение температуры ликвидус расчетным способом на основании химического анализа электролита. Так, в некоторых исследованиях с использованием многофакторного регрессионного анализа предложены уравнения расчета температуры ликвидус электролита, что позволяет при известной температуре электролита определить температуру перегрева [11 – 13].

Основным минусом уравнений определения температуры ликвидус, исходя из химического состава электролита, остается тот факт, что с точки зрения отличий типов конструкций электролизеров, их технических характеристик и влияния технологических факторов, они требуют к себе индивидуального подхода. На основании проведенных расчетов с помощью различных формул определено, что погрешность между ними может составлять 20÷30 °С, что недопустимо для управления процессом.

Цель исследования. Согласно представленным литературным данным актуальным остается вопрос разработки малозатратного и эффективного способа управления энергетическим режимом работы электролизера для увеличения технико-экономических показателей процесса электролиза алюминия.

Материалы и методы исследования. Авторами данной работы разрабатывался собственный алгоритм управления энергетическим режимом электролизера, основанный на инновационном способе определения концентрации глинозема в криолит-глиноземном расплаве [14] и базирующийся на следующих принципах:

- управление химической композицией расплава с помощью автоматизированных систем подачи фтористого алюминия и глинозема;
- оценка температурного режима электролизера путем ежедневных измерений рабочей температуры электролита;
- определение перегрева и температуры ликвидус расчетным способом на основе данных химического анализа проб электролита.

С целью построения корреляционных зависимостей использовалось изучение влияния криолитового отношения на температуру ликвидус. Анализ проб электролита проводился рентгенофлуоресцентным спектрометром ARL9800 TAXA. Всего было проведено свыше 1000 анализов проб электролита, которые отбирались совместно с определением рабочей температуры электролита, температуры ликвидус и перегрева с помощью системы «Cry-O-Therm» фирмы «Heraeus Electro-Nite».

С помощью метода регрессионного анализа была определена следующая зависимость:

$$T_L = 863,2 + 49,2 \cdot KO - 3,6 \cdot CaF_2 - 3,8 \cdot MgF_2, \quad (1)$$

где KO — криолитовое отношение, *дол. ед*; CaF_2 , MgF_2 — экспериментально определенное содержание фтористого кальция и магния в электролите, %.

С целью проведения дальнейших исследований были выполнены эксперименты по определению степени влияния на структуру температур (рабочую, ликвидус и перегрева) электролита технологических факторов: варьирования рабочего напряжения, анодных эффектов, а также операций «выливка металла» и «перестановка анодов». Методика проведения экспериментов подробно описана в работе [15].

Для поддержания оптимального энергетического режима было принято решение о разработке алгоритма и внедрении программы автоматизированного управления энергетическим режимом электролизеров по структуре температур (электролита, ликвидус и перегреву).

Важнейшей отличительной особенностью алгоритма является то, что выбор целевых значений рабочей температуры и ликвидус происходит каждый раз при анализе пробы электролита на химический состав. Таким образом, чем чаще производится отбор проб, тем с большей долей вероятности исключен фактор негативного влияния резкого изменения концентрации химических компонентов электролита, которые могут искажать выбранные целевые значения рабочей температуры и ликвидус.

Для дальнейшего использования алгоритма в условиях действующего производства была разработана программа ЭВМ «Перегрев» [16] и получено авторское свидетельство.

На основе данных о температурном режиме программа управления, установленная на технологический компьютер, выдает рекомендации по поддержанию заданного перегрева изменением на электролизерах рабочего напряжения и ежесуточной дозы фтористого алюминия. Рекомендации программы применялись на двух опытных электролизерах в течение 3-х месяцев.

Первые испытания разработанного алгоритма и программы управления энергорежимом на опытных электролизерах показали положительные результаты. По данным замеров применение программы управления помогло оптимизировать форму рабочего пространства и обеспечить оптимальные тепловые параметры электролизеров: наличие гарнисажа достаточной толщины (около 5 см), крутопадающий профиль настывли и приемлемую температуру бортовой стенки катодного кожуха, не превышающую 350 °С.

Заключение

Определение температуры ликвидус расчетным способом является малозатратным и позволяет контролировать химическую композицию электролита с целью устранения резкого изменения его состава.

Для более качественного определения влияния применения программы управления энергорежимом на технико-экономические показатели процесса необходимо проведение более длительных экспериментов на большей группе опытных электролизеров.

Литература

References

1. Tarcy G.P., Torklep K. Current Efficient in Prebake and Soderberg // *Light Metals*. 2005. P. 319-334.
2. Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Stoen L., Sterten E., and Store T. Liquidus temperature and alumina solubility in the system $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$ // *Light Metals*. 1995. P. 451-460.
3. Михалев Ю.Г., Браславский А.Б., Исаева Л.А. Влияние криолитового отношения, перегрева электролита и добавок фторида калия на скорость растворения глинозема // *Алюминий Сибири: сб. докл. XI междунар. конф. Красноярск, 2005*. С. 120-125.
4. Grotheim K., Kvande H. Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Heroult Process // *Aluminium-Verlag*. 1993. P. 232 С.
5. Paulino L., Yamamoto J., Camilli R.A., Araujo J.C. Bath ratio control improvements at Alcoa posos de caldas – Brazil // *Light Metals*. 2005. P. 419-426.
6. Meghlaoui A., Aljabri N. Aluminum Fluoride control Strategy Improvement // *Light Metals*. 2003. P. 425-435.
7. Bonnardel, O., Homsy P. The Pechiney Semi-Continuous & Automatic Measurement Device (CMD), A New Tool For Automatic Measurements // *Light Metals*. 1999. P. 303-309.
8. Турусов С.Н., Ножко С.И., Седых В.И. Сравнительная оценка датчиков измерения степени перегрева электролита в алюминиевом электролизере // *Цветная металлургия*. 2005. № 54. С. 35-38.
9. Rieck, T., Iffert M., White P., Rodrigo R., Kelchtermans R. Increased Current Efficiency and Energy Consumption at the TRITMENT Smelter Essen using 9 Box Matrix Control // *Light Metals*. 2003. P. 449-456.
10. Березин А.И., Пискажова Т.В., Грицко В.В., Тараканов А.В., Волохов И.Н. Управление технологией электролиза по перегреву электролита // *Алюминий Сибири: сб. докл. XII междунар. конф. Красноярск, 2006*. С. 207-211.
11. McFadden, F.J.S. Control of temperature in aluminium reduction cells-challenges in measurement and variability // *Light Metals*. 2001. P. 1171-1180.
12. Utigard T.A. Why 'Best' Pots Operate Between 955 and 970°C // *Light Metals*. 1999. P. 319-326.
13. Haupin W. The liquidus enigma // *Light Metals*. 1992. P. 477-480;
14. Ершов В.А., Сысоев И.А. Способ определения концентрации глинозема в криолит-глиноземном расплаве: пат. 2467095 Рос. Федерация, № 2011118778/02; заявл. 10.05.11; опубл. 20.11.12, *Бюл.* № 32. 3 с.
15. Сысоев И.А., Ершов В.А., Богданов Ю.В., Кондратьев В.В. Исследование влияния технологических факторов на температурные характеристики электролитов при производстве алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2010. № 2. С. 193-198.
16. Сысоев И.А., Ершов В.А. Программа управления энергетическим режимом электролизеров при производстве алюминия «Перегрев»: программа для ЭВМ. Св. ГР № 2014615075 Рос. Федерация; заявл. 19.03.2014; зарег. 16.05.2014. 1 с.
1. Tarcy G.P., Torklep K. Current Efficient in Prebake and Soderberg // *Light Metals*. 2005. P. 319-334.
2. Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Stoen L., Sterten E., and Store T. Liquidus temperature and alumina solubility in the system $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$ // *Light Metals*. 1995. P. 451-460.
3. Mikhalev Yu.G., Braslavskii A.B., Isaeva L.A. Influence of the cryolite ratio, overheat of electrolyte and additives of fluoride of potassium on alumina dissolution speed // *Alyuminii Sibiri: sb. dokl. XI mezhdunar. konf. Krasnoyarsk, 2005*. P. 120-125.
4. Grotheim K., Kvande H. Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Heroult Process // *Aluminium-Verlag*. 1993. P. 232 P.
5. Paulino L., Yamamoto J., Camilli R.A., Araujo J.C. Bath ratio control improvements at Alcoa posos de caldas – Brazil // *Light Metals*. 2005. P. 419-426.
6. Meghlaoui A., Aljabri N. Aluminum Fluoride control Strategy Improvement // *Light Metals*. 2003. P. 425-435.
7. Bonnardel, O., Homsy P. The Pechiney Semi-Continuous & Automatic Measurement Device (CMD), A New Tool For Automatic Measurements // *Light Metals*. 1999. P. 303-309.
8. Turusov S.N., Nozhko S.I., Sedykh V.I. Comparative assessment of sensors of measurement of degree of an overheat of electrolyte in the aluminum electrolyzer // *Tsvetnaya metallurgiya*. 2005. № 54. P. 35-38.
9. Rieck, T., Iffert M., White P., Rodrigo R., Kelchtermans R. Increased Current Efficiency and Energy Consumption at the TRITMENT Smelter Essen using 9 Box Matrix Control // *Light Metals*. 2003. P. 449-456.
10. Berezin A.I., Piskazhova T.V., Gritsko V.V., Tarakanov A.V., Volokhov I.N. Management of technology of electrolysis on an electrolyte overheat // *Alyuminii Sibiri: sb. dokl. XII mezhdunar. konf. Krasnoyarsk, 2006*. P. 207-211.
11. McFadden, F.J.S. Control of temperature in aluminium reduction cells-challenges in measurement and variability // *Light Metals*. 2001. P. 1171-1180.
12. Utigard T.A. Why 'Best' Pots Operate Between 955 and 970°C // *Light Metals*. 1999. P. 319-326.
13. Haupin W. The liquidus enigma // *Light Metals*. 1992. P. 477-480;
14. Ershov V.A., Sysyoyev I.A. Method of determination of concentration of alumina in a cryolite-aluminous fusion: pat. 2467095 Ros. Federatsiya, № 2011118778/02; zayavl. 10.05.11; opubl. 20.11.12, *Byul.* № 32. 3 p.
15. Sysyoyev I.A., Ershov V.A., Bogdanov Yu.V., Kondrat'ev V.V. Research of influence of technology factors on temperature characteristics of electrolytes by aluminum production // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. № 2. P. 193-198.
16. Sysyoyev I.A., Ershov V.A. Research of influence of technology factors on temperature characteristics of electrolytes by aluminum production «Peregrev»: programma dlya EVM. Sv. GR № 2014615075 Ros. Federatsiya; zayavl. 19.03.2014; zareg. 16.05.2014. 1 p.