

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.2.02/.09

Автоматическая подача глинозема на электролизерах с боковым токоподводом

В.А. Ершов

Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
v.ershov@mail.ru

Статья поступила 9.09.2014, принята 18.11.2014

Рассмотрено внедрение систем автоматической подачи глинозема на электролизерах с самообжигающимися анодами, боковым токоподводом. Проведен анализ технико-экономических и экологических показателей работы электролизеров. Отмечено улучшение экологической обстановки, вызванное снижением количества поточных обработок криолит-глиноземных корок электролизеров. При анализе технико-экономических показателей работы определено, что электролизеры с автоматической подачей глинозема не имеют существенных отличий. Установлено, что в автоматической системе управления технологическими процессами не работает алгоритм определения знака производной фильтрованного напряжения. Представлены результаты исследований скорости растворения глинозема, свойств криолит-глиноземных корок, образованных фторированным глиноземом. Приведен расчет разовой порции глинозема, необходимой для подачи в электролит через дозирующее устройство. Рассмотрено влияние толщины глиноземной подсыпки криолит-глиноземной корки на температуру электролита при работе электролизера в режиме автоматической подачи глинозема. Представлены результаты исследований по влиянию подачи глинозема на динамику изменения температуры электролита и температуры ликвидуса в зависимости от режимов подачи глинозема. Исследование производилось системой «Cry-O-Therm» фирмы «Heraeus Electro-Nite». Предложены рекомендации по освоению технологии электролитического получения алюминия при режиме автоматической подачи глинозема.

Ключевые слова: алюминий, электролит, глинозем, автоматическая подача, показатели процесса.

Automatic alumina feeding in electrolysis cell with lateral current lead

V.A. Ershov

Irkutsk State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
v.ershov@mail.ru

Received 9.09.2014, accepted 18.11.2014

The article considers the results of introducing automated alumina feeding systems in electrolysis cell with self-baking anodes by lateral current lead. The analysis of the technical, economic and environmental performance of electrolysis cells has been done. Improvement of the environment, caused by a decrease in the number of in-line treatments of cryolite-alumina crusts in electrolysis cell, has been pointed out. When analyzing technical and economic performance indicators, it has been found that the electrolytic cells with automatic alumina feeding do not differ substantially. It has been found that the algorithm for determining a derivative sign for filtered voltage has not worked in automatic process control system. The results of studies of alumina dissolution rate, the properties of cryolite-alumina crusts formed by fluorinated alumina, have been presented. The influence of alumina bedding thickness in cryolite-alumina crust on the electrolyte temperature during automatic alumina feeding has been studied. The results of studies of the influence of alumina feeding on the dynamics of temperature changing for the electrolyte and the liquidus temperature depending on the modes of alumina supply have been presented. The study carried out by a Cry-O-Therm system, Heraeus Electro-Nite company. The conditions for the development of aluminum output technology with the automatic feeding of alumina have been proposed.

Key words: aluminum, electrolyte, alumina, automatic feeding, process indicators.

Введение. Разработанный для электролизеров с обожженными анодами способ автоматической подачи глинозема полностью оправдал надежды разработчиков: возможность оперативного управления концентрацией глинозема в электролите с поддержанием ее в заданных оптимальных пределах привела к стабилизации энергетического режима электролизеров, состава электролита, формы рабочего пространства, снижению выбросов и, как следствие, повышению экологических и технико-экономических показателей [1 – 3]. Применение данного способа на электролизерах Содерберга

имеет ряд проблем, вызывающих трудности в освоении технологии [4].

На Кандалакшском алюминиевом заводе (КАЗ) установлены электролизеры мощностью 84,5 кА с боковым токоподводом, самообжигающимися анодами. Системами автоматической подачи глинозема (АПГ) оборудовано 35 электролизеров. На один электролизер приходится две точки подачи глинозема, что соответствует условию: 35–45 кА на одну точку. Одна точка включает бункер для глинозема, дозирующее устрой-

ство и пробойник, которые имеют отдельные механические приводы от пневмоцилиндров.

При внедрении систем АПГ электролизеры сохранили тип токоподвода, размер анода, анодную и катодную ошиновку, но изменилось количество анодных токоподводящих штырей. При монтаже пробойников потребовалось удалить один вертикальный ряд штырей из анодного массива.

С целью определения эффективности внедрения систем АПГ проведено комплексное обследование с анализом технико-экономических и экологических показателей работы электролизеров.

Экологическая эффективность. Для определения экологической эффективности внедрения АПГ с учетом данных [5] проводились инструментальные исследования количества и состава загрязнений, удаляемых общеобменной вентиляцией через аэрационные фонари электролизного корпуса. Замеры проводились в сечении фонаря над группами электролизеров, оснащенных АПГ, и без нее. Результаты замеров рассчитывались на корпус в целом, результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экологической эффективности от внедрения системы АПГ

Наименование вещества	Количество вещества, рассчитанное на год, $t / год$	
	без АПГ	с АПГ
SO ₂	20,63	17,73
CO ₂	358,18	335,36
Фториды газообразные	18,16	16,85
Фториды плохорастворимые	17,36	16,28
Бенз(а)пирен	0,0136	0,0111
Нафталин	0,2176	0,1927
Углеводороды предельные C ₁₂ -C ₁₉	15,98	14,45
Al ₂ O ₃	32,81	27,72
Пыль неорганическая	39,55	36,48

Данные табл. 1 подтверждают, что при условии внедрения систем АПГ на все электролизеры возможно снижение выбросов загрязняющих веществ через аэрационные фонари корпуса. Причиной улучшения экологической обстановки является снижение трудозатрат по обновлению криолит-глиноземной корки электролизеров до 1,5 шт/сутки против восьми обработок за сутки для электролизеров без АПГ.

Технологическая эффективность. При анализе технико-экономических показателей работы отмечено, что электролизеры с АПГ не имеют существенных различий с ваннами без АПГ.

Отсутствие повышения показателей обусловлено рядом причин.

1. Конструкция электролизера с боковым токоподводом рассчитана на применение технологии с поточно-регламентированной обработкой.

Известно, что технология работы ванн в режиме АПГ значительно отличается от традиционной и позволяет исключить поточно-регламентированную обработку [6, 7]. Но, так как электролизеры КАЗа имеют две точки подачи глинозема, обработать технологиче-

ский регламент в режиме АПГ не удалось. При отказе одной точки необходимо отключать систему АПГ полностью, т. к. одного узла для питания ванны недостаточно – точка не способна принять двойную дозу и забивается. Если ремонт затягивается на длительный срок, приходится переводить ванну на обработку по потоку.

При поточной обработке и в режиме АПГ процессы кристаллизации и плавления играют главную роль в формировании боковой и подовой настывы [8, 9]. Различный характер рабочего пространства при поточной обработке и в режиме АПГ подтверждается анализами состава боковой и подовой настывы. В первом случае имеет место большее содержание глинозема, во втором — криолита.

Обследование формы рабочего пространства показало, что геометрия настывы и распределение осадка на электролизерах с АПГ однотипны. Бортовая футеровка не имеет защитной настывы, за исключением отдельных участков в районе пробойников. Наблюдается износ боковых блоков до 5–6 см, отмечены случаи их разрушения.

Уменьшение толщины или полное исчезновение боковой настывы связано с тем, что при переходе на режим АПГ состав электролита и температура процесса не изменялись. В результате тепловой поток через бортовую стенку электролизера практически ничем не компенсировался.

Теоретически [8, 9], для сохранения бортовой настывы необходимо снизить тепловой поток через бортовую футеровку электролизера. Существует два пути — снижение коэффициента теплообмена и снижение перегрева электролита относительно температуры ликвидус. Коэффициент теплообмена зависит от конструктивных особенностей электролизера, так как именно они определяют векторы скорости расплава в электролизере. Поднятие температуры ликвидус позволяет снизить тепловой поток без изменения конструкции катодного узла. Эта задача может быть решена подбором химического состава электролита и поддержанием его в заданных пределах.

2. После внедрения «сухой» газоочистки в качестве сырья для производства алюминия и создания криолит-глиноземной корки применяется фторированный глинозем.

Свойства фторированного глинозема отличаются от первичного [10]. Основные отличия в насыпной плотности и скорости растворения, формировании криолит-глиноземной корки.

При оценке работы дозирующего устройства системы АПГ установлено, что разовая порция увеличилась с 900 до 1200 гр. при переходе со свежего глинозема на фторированный. Данная порция фторированного глинозема значительно превышает теоретическую величину дозы. Расчет для системы АПГ из двух точек подачи глинозема приведен ниже.

Потребность электролизера на силу тока 84,5 кА в глиноземе:

$$0,335845 \cdot 0,9051925 = 49315,$$

кг/час (0,822 кг/мин),

где 1,925 кг/кг Al — коэффициент использования глинозема; 0,905 — выход по току.

Принимая, что 10 % глинозема поступает с корки, одна точка должна подать:

$$\frac{(0,822 - 0,0822)}{2} = 0,37,$$

кг/мин.

Таким образом, теоретически, разовая доза свежего глинозема составляет 370 гр.

Проведенные исследования [11] скорости растворения глинозема в криолит-глиноземном расплаве показали, что фторированный глинозем растворяется в 1,5–2 раза быстрее, чем свежий. Следовательно, теоретическая доза фторированного глинозема может составить 700 гр.

Исследования свойств криолит-глиноземных корок показали, что корки, образованные фторированным глиноземом, мягкие, пористые и менее прочные, чем из свежего глинозема. Время растворения криолит-глиноземной корки, образованной свежим глиноземом, в 1,5 раза больше, чем для корки, сформированной фторированным глиноземом. При этом отмечено, что корка, сформированная фторированным глиноземом, растворяется в расплаве в 2,5 раза медленнее, чем фторированный глинозем. Измерения также показали, что плотность корки из фторированного глинозема составляет 1,7–2,4 г/см³ против 2,4–2,7 г/см³ для свежего глинозема.

Проведен эксперимент по определению влияния толщины глиноземной засыпки на температуру электролита при работе электролизера в режиме АПГ.

Эксперимент проходил в течение 12 часов на двух электролизерах. На опытном электролизере перед первым замером температуры на криолит-глиноземную корку был подсыпан глинозем, толщина засыпки составила восемь сантиметров. На электролизере-свидетеле подсыпка глинозема не производилась и составила четыре сантиметра. Замер температуры электролита происходил через каждые полтора часа, подсыпка глинозема на опытном электролизере производилась только по мере необходимости, т. е. при самопроизвольном обрушении корки или образовании лишних огоньков.

При поддержании толщины засыпки криолит-глиноземной корки на уровне восьми сантиметров, уже после семи часов температура поднялась до 950 °С и на протяжении последующих 16 часов не снижалась. На электролизере-свидетеле в течение эксперимента температура изменялась от 936 до 943 °С в зависимости от режима подачи глинозема.

Таким образом, использование только фторированного глинозема в качестве засыпки может привести к дополнительному расходу тепла, в результате чего требуется держать высокое напряжение электролизера (4,5 В) для стабилизации теплового баланса.

3. От алгоритма управления системой АПГ зависит поддержание необходимой концентрации глинозема в электролите. Качество алгоритма определяется достижением высокого значения выхода по току при минимальном расходе электроэнергии [12, 13].

Алгоритм поддерживает концентрацию глинозема в электролите, регулируя частоту срабатывания дозатора и пробойника. Если глинозем подавать исходя из расчета его теоретической потребности в заданный интервал времени, к примеру, один раз в минуту, система АСУ ТП окажется совершенно неэффективной. Система не определит, в связи с чем происходит рост напряжения — из-за низкой концентрации глинозема в электролите или из-за накопления глиноземистых осадков на подине электролизера.

На КАЗе алгоритм управления концентрацией глинозема в расплаве имеет пять режимов подачи («базовый», «редкий», «частый», «сопровождение обработки», «голод»). При работе режима «базовый» глинозем подается исходя из расчета его теоретической потребности (коэф. 100 %). В режиме «частый» коэффициент больше 100 %, а для режимов «редкий», «сопровождение обработки» и «голод» — меньше 100 %.

На ваннах с АПГ проведена работа по определению влияния подачи глинозема на динамику изменения температуры электролита и температуры ликвидуса в зависимости от режимов питания. Исследование производилось системой «Cry-O-Therm» фирмы «HeraeusElectro-Nite» [14, 15]. Замеры на опытных электролизерах производились каждые 30 мин. в течение пяти часов. Результаты измерений температур в зависимости от режимов питания электролизера показали, что:

- отчетливо просматривается влияние режима «Голод» на изменение температуры электролита и ликвидуса. На всем промежутке работы режима происходит снижение концентрации глинозема в электролите, в результате происходит рост температуры ликвидуса и электролита;

- в режиме «частый» температура как электролита, так и ликвидуса снижается. С термодинамической точки зрения это объясняется тем, что процесс нагрева и растворения глинозема — эндотермический (теплопоглощающий), что приводит к понижению температуры электролита по мере его введения. Данное поведение отмечается при работе режима «сопровождение обработки» и после возникновения анодного эффекта, т. к. происходит обрушение криолит-глиноземной корки и создание новой;

- в режиме «редкий» концентрация растворенного глинозема снижается, при этом наблюдается рост температуры ликвидуса, растет греющее напряжение и соответственно растет температура электролита.

Имеющиеся колебания перегрева электролита (4–29 °С) сигнализировали о повышенной концентрации глинозема в электролите [16, 17]. Для подтверждения данного предположения на электролизерах были отобраны пробы электролита. Результаты химического состава и концентрации глинозема в электролите сопоставлены с режимом питания электролизера и его длительностью перед отбором проб. Анализ данных показал: по химическому составу электролиты однотипны; при длительных режимах «редкий» и «голод» имеют высокую концентрацию глинозема, 3–4 %; электролизеры большую часть времени работают на электролите с избыточным содержанием глинозема.

При определении причины постоянного перенасыщения электролита глиноземом установлено, что в системе АСУ ТП «Электра» не доработан алгоритм определения знака производной фильтрованного напряжения. В результате режим подачи «частый» не мог закончиться при условии положительного значения производной фильтрованного напряжения. В связи с этим выход из частого питания происходил только по превышению его длительности.

Заключение

Внедрение и освоение систем АПГ на электролизерах с самообжигающимся анодом и боковым токоподводом подразумевает решение комплекса вопросов по обеспечению устойчивой работы оборудования и про-

граммного обеспечения. При этом технология работы электролизера в режиме АПГ значительно отличается от традиционной технологии, и это требует поиска оптимальных технологических параметров работы электролизеров. На электролизерах с расстроенной технологией АПГ не дает положительного эффекта.

Таким образом, для получения экологического и технико-экономического эффекта от автоматической подачи глинозема рекомендуется:

- при выборе дозы глинозема на одну точку подачи учитывать свойства используемого сырья;
- доработать алгоритм управления системой АПГ;
- внедрить программу управления энергобалансом по расчетной температуре перегрева.

Литература

1. Mourao R., Fernandes A. Point feeding alumina in aluminum electrolysis cell with lateral current lead // *Light Metals*. 1999. P. 319-334.
2. Поляков П.В. Современное состояние технологии производства алюминия и перспективы ее развития // *Материалы VIII Высших российских алюминиевых курсов*. Красноярск: Изд-во ГУЦМиЗ; Легкие металлы, 2005. С. 214.
3. Лебедев В.А., Логинова И.В., Ордон С.Ф., Письмак В.Н. Новые технологии в металлургии алюминия // *Материалы VIII Высших российских алюминиевых курсов*. Красноярск: Изд-во ГУЦМиЗ; Легкие металлы, 2005. С. 1-3.
4. Васюнина И.П., Поляков П.В. Выход по току // *Материалы VIII Высших российских алюминиевых курсов*. Красноярск: Изд-во ГУЦМиЗ; Легкие металлы, 2005. С. 1-27.
5. Кондратьев В.В., Шахрай С.Г. Исследования и разработка предложений по оптимизации аэродинамических параметров систем газоудаления от электролизеров Кандалакшского и Богословского алюминиевых заводов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 6. С. 91–98.
6. 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.
7. Grotheim K., Welch B. *Aluminium Smelter Technology*, 2 ed. // Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1988. p. 328.
8. Grotheim K., Kvande H. *Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Heroult Process* // Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1993. 232 c.
9. Xiaoling L., Purdie J.M., Mark P. Measurement and modeling of alumina mixing and dissolution for varying electrolyte heat and mass transfer conditions // *Light Metals*. 1991. P. 289-298.
10. Исаева Л.А., Поляков П.В. Глинозем в производстве алюминия электролизом // *Материалы VIII Высших российских алюминиевых курсов*. Красноярск: Изд-во ГУЦМиЗ; Легкие металлы, 2005. С. 1-13.
11. Исаева Л.А., Поляков П.В. Глинозем в производстве алюминия электролизом // *Свойства и поведение в электролизере*. Красноуральск: БАЗ, 2000. 199 с.
12. Ершов В.А., Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Богданов Ю.В., Камаганцев В.Г. Управление концентрацией глинозема в электролите при производстве алюминия // *Металлург*. 2011. № 11. С. 96-101.
13. Reverdy M. Computer control of cells: Proc. of the 16th Int. Course on the Process Metallurgy of Aluminium (Trondheim, Norway, 26– 30 May, 1997).
14. 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.
15. Сысоев И.А. Опыт управления энергетическим режимом электролизеров с обожженными анодами на силу тока

300 кА // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2007. Т. 2, № 30. С. 23-26.

16. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразудинов Г.А. Электрометаллургия алюминия // Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
17. 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.

References

1. Mourao R., Fernandes A. Point feeding alumina in aluminum electrolysis cell with lateral current lead // *Light Metals*. 1999. P. 319-334.
2. Polyakov P.V. Modern state technology of production of aluminum and its prospects // *Materialy VIII Vysshikh rossiiskikh alyuminievykh kursov*. Krasnoyarsk: Izd-vo GUTsMiZ; Legkie metally, 2005. P. 214.
3. Lebedev V.A., Loginova I.V., Ordon S.F., Pis'mak V.N. New technologies in metallurgy of aluminum // *Materialy VIII Vysshikh rossiiskikh alyuminievykh kursov*. Krasnoyarsk: Izd-vo GUTsMiZ; Legkie metally, 2005. P. 1-3.
4. Vasyunina I.P., Polyakov P.V. Current output // *Materialy VIII Vysshikh rossiiskikh alyuminievykh kursov*. Krasnoyarsk: Izd-vo GUTsMiZ; Legkie metally, 2005. P. 1-27.
5. Kondrat'ev V.V., Shakhrai S.G. Research and development of proposals for optimization of aerodynamic parameters of electrolytic gas removal systems Kandalakshsky and Bogoslovsky aluminum smelters // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 6. P. 91–98.
6. 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.
7. Grotheim K., Welch B. *Aluminium Smelter Technology*, 2 ed. // Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1988. P. 328.
8. Grotheim K., Kvande H. *Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Heroult Process* // Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1993. 232 p.
9. Xiaoling L., Purdie J.M., Mark P. Measurement and modeling of alumina mixing and dissolution for varying electrolyte heat and mass transfer conditions // *Light Metals*. 1991. P. 289-298.
10. Isaeva L.A., Polyakov P.V. Alumina in the production of aluminum by electrolysis // *Materialy VIII Vysshikh rossiiskikh alyuminievykh kursov*. Krasnoyarsk: Izd-vo GUTsMiZ; Legkie metally, 2005. P. 1-13.
11. Isaeva L.A., Polyakov P.V. Alumina in the production of aluminum by electrolysis // *Properties and behavior in an electrolytic cell // Svoistva i povedenie v elektrolizere*. Krasnotur'insk: BAZ, 2000. 199 p.
12. Ershov V.A., Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Bogdanov Yu.V., Kamagantsev V.G. Control alumina concentration in the electrolyte in the production of aluminum // *Metallurg*. 2011. № 11. P. 96-101.
13. Reverdy M. Computer control of cells: Proc. of the 16th Int. Course on the Process Metallurgy of Aluminium (Trondheim, Norway, 26– 30 May, 1997).
14. Turusov S.N., Nozhko S.I., Sedykh V.I. Comparative evaluation of sensors for measuring the degree of overheating of the electrolyte in aluminum electrolysis // *Tsvetnaya metallurgiya*. 2005. № 54. P. 35-38.
15. Sysoev I.A. Experience in managing a power mode electrolyzers with burnt anodes 300 kA current // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007. Т. 2, № 30. P. 23-26.
16. Mintsis M.Ya., Polyakov P.V., Sirazutdinov G.A. *Electrometallurgy of aluminum* // Novosibirsk: Nauka, 2001. 368 p.
17. 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.

