

УДК 661.931

Г.И. ЩЕРБАНЬ*, **И.Е. ЛУКОШНИКОВ***(канд.техн.наук, ст.науч.сотр.),
В.Н. БРЕДИХИН**(канд.техн.наук, ст.науч.сотр.), **Д.В. ПРУТЦКОВ*****
(д-р хим.наук, ст.науч.сотр.), **И.Ф. ЧЕРВОНЫЙ***(д-р техн.наук, проф.),
Н.А.МАНЯК*(д-р техн.наук, проф.)

*Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье

**Донецкий национальный технический университет, Донецк

***Государственный научно-исследовательский и проектный институт
Титана, Запорожье

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

Разработан метод снижения энергоёмкости процесса электролиза алюминия при повышении качества его проведения, стабилизация содержания глинозёма и фторидов на оптимальном уровне. Стабилизация магнитогидродинамического режима достигается путём контроля межполюсного расстояния и удельного сопротивления электролита. Периодическая корректировка положения анода с чередованием циклов автоматической подачи глинозёма увеличила скорость циркуляции электролита, что способствует интенсификации растворения глинозёма и его равномерному распределению в электролите, более равномерному сгоранию подошвы анода и вымыванию угольной пены из под неё. Применение измерителя величины перемещения анода, позволило определять параметры электролиза не только для ванн с домкратной, но и с тросовой подачей анода.

Ключевые слова: алюминий, глинозём, электролизёр, стабилизация, контроль, межполюсное расстояние.

Введение

При решении задачи снижения удельного расхода электроэнергии при производстве алюминия, затраты энергии на практике остаются выше теоретических расчётов. Основной причиной при этом является повышенное напряжение на ванне, состоящее из омического падения напряжения в электролите и обратной ЭДС. Рабочее напряжение на электролизёре зависит от размеров, формы и материала электродов, интенсивности конвективных потоков в расплаве, падения напряжения в самом электролите и многих других факторов. Для уменьшения падения рабочего напряжения на электролизёре при постоянной плотности тока только одно сопротивление – сопротивление расплава, может варьироваться подбором изменения межполюсного расстояния (МПР) и состава электролита, с целью уменьшения его удельного сопротивления.

На практике выход по току всегда остаётся ниже теоретически возможного из-за потерь электричества на протекание побочных электрохи-

мических процессах и нагрев. При прочих неизменных условиях, выход по току возрастает с увеличением МПР и падает с его уменьшением (рис. 1). На промышленных электролизёрах МПР находится в пределах 45...60 мм, но с увеличением МПР выше оптимального значения выход по току растёт несущественно, а расход электроэнергии и перегрев электролита повышаются, снижая производительность электролизёра [1].

Общепринятая методика измерения МПР основана на определении расстояния между подошвой анода до границы разделения фаз «металл-электролит» основана на измерении падения напряжения в межполюсном пространстве электролизёра между помещаемым в расплав алюминия щупом, и щупом, упираемым в тело анода на уровне поверхности электролита. Данная методика характеризуется высокой погрешностью измерений, связанной с неточной оценкой границы раздела фаз и колебаниями тока на серии в момент измерений.



Рисунок 1 – Влияние межполюсного расстояния на выход по току для двух различных конструкций электролизёров.

В случаях, когда конструкция электролизёра имеет домкратную систему подачи анода, используется методика определения эквивалентного удельного сопротивления (1), путём перемещения анода с последующим вычислением разности рабочего напряжения до и после перемещения анода, и делением на средний ток серии за время перемещения анода.

$$\rho = \frac{U_1 - U_2}{I_s} \cdot \frac{S}{\Delta h} \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление электролита, Ом×мм (численно равно сопротивлению электролита с высотой столба 10мм и поперечным сечением 10 мм²), S – площадь сечения электролита между анодом и катодом, мм², Δh – величина перемещения анода при подаче, которая вычисляется по времени перемещения анода, мм, I_c – величина тока серии, кА, U_1 , U_2 – величины рабочего напряжения до и после подачи анода, соответственно, В.

Использование времени в качестве величины перемещения анода, даёт большую погрешность по следующим причинам:

- помехи, создаваемые сопротивлением газвыделяющего слоя электролита при измерении рабочего напряжения электролизёра;
- разброс и изменение во времени параметров питающего напряжения двигателя перемещения анода, что приводит к невозможности по времени подачи судить о количестве произведённых оборотов;
- невозможность точного определения времени перемещения анода, из-за времени, свободного хода механической передачи при подачах анода вниз или вверх;
- разброс параметров двигателей, из-за износа узлов двигателя и частей механической передачи.

В настоящее время наиболее быстрыми методами определения удельного сопротивления электролита, являются ручные замеры температуры начальной стадии кристаллизации, реализуемые с помощью различных портативных измерительных систем [2, 3]. Имея результаты измерений, по эмпирическим формулам производится расчёт состава электролита [4, 5, 6, 7] и удельное электрическое сопротивление электролита [8, 9, 10, 11, 12]. Однако, практическое применение этих методов затруднено, т.к. электрическое сопротивление промышленных электролитов отличается от аналогичных величин, измеренных в лабораторных условиях на чистых солях. Кроме того, необходимо учитывать наличие в электролите угольной пены, взвеси Al_2O_3 , пузырьков газа, а также примесей (Fe_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 , SO_4^{2-} , CuO и др.), которые поступают в электролит с исходными материалами.

Цель работы

Целью работы являлось определение межполюсного расстояния и удельного сопротивления электролита. В статическом состоянии анода определение МПР и удельного электрического сопротивления электролита возможны только путём прямых измерений. Задачей данной работы являлось разработка методики расчёта удельного сопротивления электролита и величины межполюсного расстояния в динамике, путём использования методики расчёта обратной ЭДС и общего сопротивления электролизёра [13], а так же периодических перемещений анода и измерений величины его перемещения.

Основная часть

Общее активное сопротивление электролизера представляет собой сумму

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{кат}} + R_{\text{ан}} + R_{\text{эл.газ}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{общ}}$ - общее активное сопротивление электролизёра, Ом; $R_{\text{кат}}$ - сопротивление катодного узла (подина, расплав алюминия, ошиновка), Ом; $R_{\text{ан}}$ - сопротивление анодного узла (анод, штыри, ошиновка), Ом; $R_{\text{эл.газ}}$ - сопротивления электролита с учётом газонаполнения, $R_{\text{эл.газ}} = R_{\text{эл}} + R_{\text{газ}}$, Ом.

Межполюсное расстояние определяется

$$h_{\text{МПР}} = \frac{R_{\text{эл.газ}} S_{\text{ак}}}{\rho_{\text{эл.газ}}} \quad (3)$$

где $h_{\text{МПР}}$ – межполюсное расстояние, т.е. расстояние от поверхности подошвы анода до поверхности металла в плоскости протекания тока, мм, $S_{\text{ан}}$ – площадь анода, мм², которая в свою очередь определяется как

$$S_{\text{ан}} = S_{\text{под.ан}} + S_{\text{бок.пов.ан}} \quad (4)$$

где $S_{\text{под.ан}}$ – площадь подошвы анода, мм²; $S_{\text{бок.пов.ан}}$ – площадь боковой поверхности анода, погруженной в электролит, мм²; $\rho_{\text{эл.газ}}$ – удельное электрическое сопротивления электролита с учётом газонаполнения, Ом×мм.

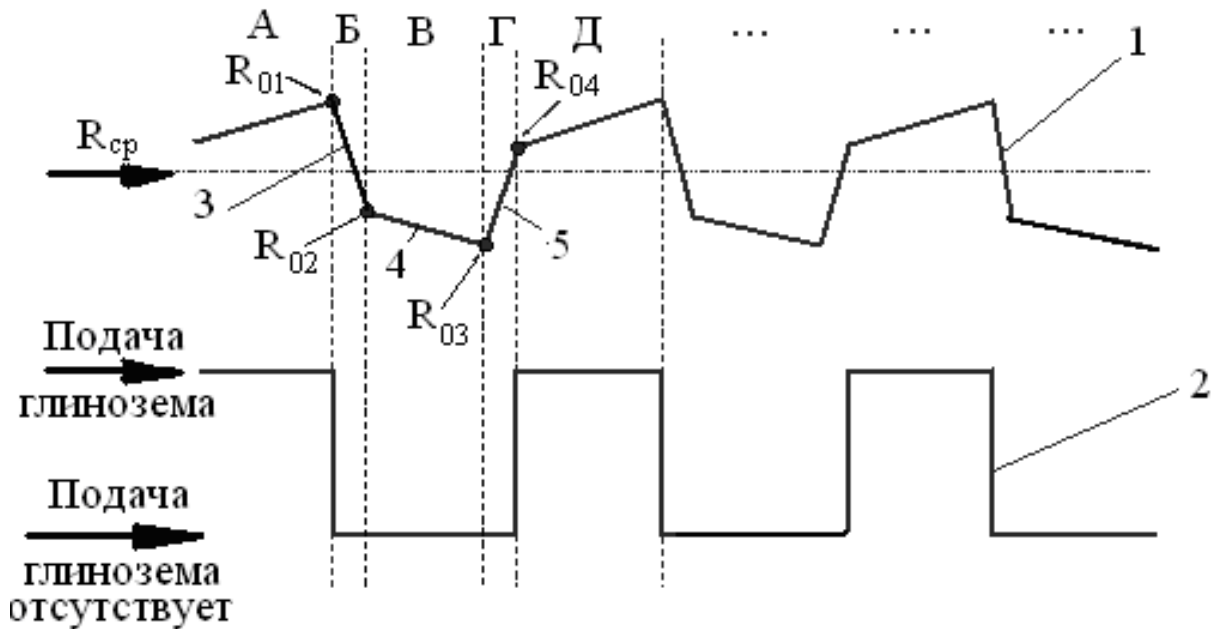
Путём использования вычисленных величин общего сопротивления электролизёра [13] и результатов измерения величины перемещения анода, производился расчет удельного электрического сопротивления электролита и межполюсного расстояния. В расчётах применялись известные для проводимых исследований величины: площадь подошвы анода $S_{\text{под.ан}}$, площадь боковой поверхности анода $S_{\text{бок.пов.ан}}$, сопротивление газонаполненного слоя до ($R_{\text{газ1}}$) и после ($R_{\text{газ2}}$) подачи анода, которые были равны между собой ($R_{\text{газ1}} = R_{\text{газ2}}$); изменение температуры электролита и криолитового отношения за время между перемещениями анода. Величины $R_{\text{кат}}$ и $R_{\text{ан}}$ не учитывались, ввиду незначительного их изменения. Величины перемещения анода измерялись и записывались следующим образом:

- h_1 – неизвестная величина МПР до первого перемещения анода,
- $h_2 = h_1 + \Delta h_1$ – МПР после первого перемещения анода (уч. Б, рис. 2),
- $h_3 = h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_2$ – МПР перед новой подачей глинозёма (уч. Г, рис. 2).

Определение общего активного сопротивления электролизёра проводилось постоянно в режиме реального времени. В расчётах использовались данные точек R_{01} , R_{02} , R_{03} (до и после первого и второго перемещения анода), а также перед новой подачей глинозёма – R_{04} (см. рис. 2).

Характер изменения электрического сопротивления электролита можно объяснить следующим. При первой подаче глинозёма (период А) общее сопротивление электролита повышается до величины R_{01} , вследствие медленного растворения его в электролите. Последующее снижение сопротивления электролита до величины R_{02} (период Б) вызвано опусканием анода для уменьшения величины рабочего напряжения. На участке периода В, при отсутствии подачи глинозёма, продолжается снижение сопротивления электролита до минимального значения R_{03} , которое вызвано растворением глинозёма в электролите. На участке периода Г производился подъем ано-

да до достижения величины R_{04} . В дальнейшем (период Д) производилась новая (очередная) подача глинозёма, при этом электрическое сопротивление электролита, как и в периоде А, повышается и достигает величины R_{01} . Последующие циклы работы электролизёра (Д и далее) аналогичны периодам А-Б-В-Г.



А, Б, В, Г, Д – периоды работы электролизёра; 1 – общее электрическое сопротивление электролизёра; 2 – режимы автоматической подачи глинозёма; А – период подачи глинозёма в электролизёр; Б (поз. 3) – период (режим) опускания анода; В (поз.4) – период статического положения анода (режим стабилизации); Г (поз. 5) – период подъёма анода; Д – новый период подачи глинозёма; $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$ – общее электрическое сопротивление электролизёра при изменении режима подачи анода; $R_{ср}$ – среднее значение электрического сопротивления электролизёра.

Рисунок 2 – Изменение общего активного сопротивления электролизёра в зависимости от режима подачи глинозёма и анода.

Величины общего электрического сопротивления электролизёра при первом и последующих перемещениях анода определялись следующим образом:

- перед первым опусканием анода, т.е. после первой подачи глинозёма

$$R_{01} = R_{кат} + R_{ан} + R_{эл.газ} + \frac{\rho_{01} \cdot h_1}{S_{ан,01}}, \quad (5)$$

$$S_{ан,01} = S_{под.ан} + S_{бок.пов.ан} = S_{под.ан} + P_{бок.пов.ан} \cdot h_1, \quad (6)$$

где $S_{ан,01}$ – площадь анода после первой подачи глинозёма, $м^2$; $P_{бок.пов.ан}$ – периметр боковой поверхности анода, $м$; ρ_{01} – удельное электрическое сопротивление электролита после первой подачи глинозёма, $Ом \times м$;

– после первого опускания анода

$$R_{02} = R_{кат} + R_{ан} + R_{эл.газ} + \frac{\rho_{01} \cdot (h_1 - \Delta h_1)}{S_{ан,02}}, \quad (7)$$

$$S_{ан,02} = S_{ан,01} - S_{\Delta h_1}, \quad (8)$$

где $S_{ан,02}$ – площадь анода после первого опускания его в электролит, $м^2$; $S_{\Delta h_1}$ – изменение площади боковой поверхности анода, с учётом первого опускания анода, $м^2$;

$$S_{\Delta h_1} = P_{бок.пов.ан} \cdot \Delta h_1; \quad (9)$$

– после режима стабилизации, перед подъёмом анода

$$R_{03} = R_{кат} + R_{ан} + R_{эл.газ} + \frac{\rho_{02} \cdot (h_1 - \Delta h_1)}{S_{ан,02}}, \quad (10)$$

где ρ_{02} – удельное электрическое сопротивление электролита после первого опускания анода, $Ом \times м$;

– после подъёма анода, перед новой подачей глинозёма

$$R_{04} = R_{кат} + R_{ан} + R_{эл.газ} + \frac{\rho_{02} \cdot (h_1 - \Delta h_1 + \Delta h_2)}{S_{ан,03}}, \quad (11)$$

$$S_{ан,03} = S_{ан,02} + \Delta S_{\Delta h_2}, \quad (12)$$

где $S_{ан,03}$ – площадь анода после подъёма, перед новой подачей глинозёма, $м^2$; $S_{\Delta h_2}$ – изменение площади боковой поверхности анода, с учётом его подъёма, $м^2$;

$$S_{\Delta h_2} = P_{бок.пов.ан} \cdot \Delta h_2. \quad (13)$$

После соответствующих преобразований уравнений (5), (7), (10), (11) получим уравнение для расчёта значения $h_{МПР}$ после первой подачи глинозёма, которое учитывает изменение технологических характеристик работы электролизёра при последовательно чередующихся подачах глинозёма

$$h_1 = \frac{(R_{01} - R_{04}) \cdot S_{ан,01} \cdot S_{ан,03} - \rho_2 \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2)}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (14)$$

Для повышения точности определения МПР, производится пересчёт для двух значений электрического сопротивления электролизёра, т.е. при каждой новой подаче глинозёма рассчитывается новое и пересчитывается предыдущее значения сопротивления и, соответственно, новое и предыдущее значения МПР.

Выводы

Использование рассмотренного метода обеспечивает снижение энергоёмкости процесса электролиза при повышении качества его проведения, стабилизацию содержания глинозёма и фторидов на оптимальном уровне, стабилизацию магнитогидродинамического режима путём контроля межполюсного расстояния и удельного сопротивления электролита. Периодическая корректировка положения анода с чередованием циклов автоматической подачи глинозёма увеличивают скорость циркуляции электролита, что способствует интенсификации растворения глинозёма и его равномерному распределению в электролите, более равномерному сгоранию подшвы анода и вымыванию угольной пены из-под неё. Применение измерителя величины перемещения анода, позволяет определять параметры электролиза не только для ванн с дократной, но и с тросовой подачей анода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aluminum electrolysis / Grjotheim K. et al. – Dusseldorf: Aluminum-Verlag, 1982. – 271 p.
2. Сенсорное устройство, для измерения температуры и способ измерения температуры ликвидуса криолитовых расплавов: патент РФ №2128826 / Ферштрекен Пауль Клемент (BE), Аэгтен Йозеф Теодор (BE). – 1999.
3. Способ определения температуры ликвидуса расплава электролита в алюминиевом электролизере и устройство для его осуществления: патент РФ №2303246 / А.И. Березин, С.Н. Турусов, С.И. Ножко и др. – 2007.
4. Liquidus Temperature and Alumina Solubility in the System $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$ / S. Solheim, E. Rolseth, L. Skybakmoen et al. // Light Metals. – 1995. – P. 451-460.
5. Peterson R.D. Liquidus Curves for the Cryolite- $\text{AlF}_3\text{-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System in Aluminum Cell Electrolytes / R.D. Peterson, A.T. Tabereaux // Light Metals. – 1987. – P. 383-388.
6. Determination of Melting Temperatures and Al_2O_3 Solubilities for Hall Cell Electrolyte Compositions / S.S. Lee, K.-S. Lei, P. Xu, Jr. Brown // Light Metals. – 1984. – P. 841-855.
7. Dewing E.W. The Chemistry of the Alumina Reduction Cell / E.W. Dewing // Can. Metallurgical Quarterly. – 1974. – Vol.13. – No.4. – P. 607-618.
8. Electrical Conductivity of Molten Cryolite-Based Mixtures Obtained with a Tube-Type Cell made of Pyrolytic Boron Nitride / J. Híveš, J. Thonstad, Å. Sterten, P. Fellner // Light Metals. – 1994. – P. 187-194.
9. Wang L. The Electrical Conductivity of Cryolite Melts Containing Aluminum Carbide / L. Wang, A.T. Tabereaux, N.E. Richards // Light Metals. – 1994. – P. 177-194.
10. Wang X.W. A Multiple Regression Equation for the Electrical Conductivity of Cryolite Melts / X.W. Wang, R.D. Peterson, A.T. Tabereaux // Light Metals. – 1993. – P. 247-255.
11. Density Electrical Conductivity and Viscosity of Low Melting Baths for Aluminium Electrolysis / M. Chrenková, V. Danek, A. Silný, T. Utigard // Light Metals. – 1996. – P. 227-232.

12. Choudhary G. Electrical Conductivity for Aluminum Cell Electrolyte between 950 - 1025°C by Regression Equation / G. Choudhary // Electrochem Soc. – 1973. – Vol.120. – No.3. – P. 381-383.
13. Контроль обратной ЭДС и общего сопротивления алюминиевого электролизёра / Г.И. Щербань, И.Е. Лукошников, Д.В. Прутцков, и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/6 (51). – С. 14-17.

Надійшла до редакції 29.08.2012

Рецензент канд. техн. наук, доц. Є.Л. Корзун

Г.І. Щербань*, І.Є. Лукошніков*, В.М. Бредихін**, Д.В. Прутцков***, І.Ф. Червоний*, М.О. Маняк**

*Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, ** Донецький національний технічний університет, Донецьк, *** Титанпроект, Запоріжжя

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЮ

Розроблено метод зниження енергоємності процесу електролізу алюмінію при підвищенні якості його проведення, стабілізація змісту глинозему і фторидів на оптимальному рівні. Стабілізація магнітогідродинамічного режиму досягається шляхом контролю міжполюсної відстані і питомого опору електроліту. Періодичне коректування положенням анода з чергуванням циклів автоматичної подачі глинозему збільшує швидкість циркуляції електроліту, що сприяє інтенсифікації розчинення глинозему та його рівномірному розподілу в електроліті, більш рівномірному згоранню підшови анода і вимивання вугільної піни з під неї. Застосування вимірювача величини переміщення аноду, дозволило визначати параметри електролізу не тільки для ванн з домкратною, але і з тросовою подачею анода.

Ключові слова: алюміній, глинозем, електролізер, стабілізація, контроль, межполюсна відстань.

G.I. Scherban*, I.E. Lukoshnikov*, V.N. Bredykhin**, D.V. Pruttskov***, I.F. Chervony*, M.O. Manyak**

* Zaporozhye state engineering academy, Zaporizhzhya, ** Donetsk national technical university, Donetsk, *** State Titanium research and design institute, Zaporizhzhya

OPTIMIZATION OF ELECTROLYZER PARAMETERS FOR ALUMINUM PRODUCTION

We developed a method that reduces energy intensity of aluminum electrolysis process and improves its quality. Stabilization of magneto-hydrodynamic modes is achieved by controlling the distance between the poles and the resistivity of the electrolyte. Periodic adjustment of the anode with alternating cycles of automated clay feed increases electrolyte circulation rate, thus intensifying clay dissolution and its uniform distribution in the electrolyte, and leading to a more uniform combustion of the anode base and coal froth washing from under it. Using the anode displacement meter we defined the electrolysis parameters for the baths with jack and cable anode feeding .

Keywords: aluminum, clay, electrolyzer, stabilization, control, interpolar distance.