ФОРМИРОВАНИЕ ГАРНИСАЖА И НАСТЫЛИ В АЛЮМИНИЕВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ

© 2019 г. А.М. Иванова, П.А. Архипов, А.В. Руденко, О.Ю. Ткачева, Ю.П. Зайков

Научно-технический центр «Элтер», г. Красноярск

Институт высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Уральский федеральный университет (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 22.04.19 г., доработана 04.06.19 г., подписана в печать 07.06.19 г.

Проведено экспериментальное исследование динамического поведения (образования/растворения) гарнисажа и настыли в зависимости от температуры перегрева электролита, теплового сопротивления материала футеровки и состава криолит-глиноземного электролита с использованием модельной установки, имитирующей реальные условия электролитического получения алюминия. В переднюю стенку корпуса установки было вмонтировано окно, позволяющее менять материал футеровки. Формирование гарнисажа и настыли происходит за счет теплового потока, создаваемого вследствие разности температур электролита и стенок электролизера. Криолитовое отношение электролита (КО) варьировали в интервале 2,1–2,5. Концентрация глинозема в электролите не превышала 4,5 мас.%. Изменение формы рабочего пространства в электролизере в течение электролиза определяли по толщине образующихся гарнисажа и настыли. Активное формирование гарнисажа в экспериментальной ячейке начинается при перегреве 3-4 град. Показано, что при снижении теплового сопротивления материала футеровки с 16 до 14 M^2/BT при одной и той же температуре перегрева образуется гарнисаж с большей толщиной, однако при сформированном гарнисаже уменьшение теплового сопротивления практически не сказывается на его толщине. Так же как и в промышленном электролизере, профиль гарнисаж-настыль, сформированный в экспериментальной ячейке, можно условно разделить на три зоны: настыль; гарнисаж на границе металл/электролит; гарнисаж. Динамическое поведение гарнисажа отличается от поведения настыли: при более высоком КО электролита толщина образующегося гарнисажа больше, а настыли – меньше. Химический анализ компонентов в образцах сухой выбойки показал, что КО и концентрации Al₂O₃ возрастают по высоте ячейки сверху вниз. Сделан вывод о том, что гарнисаж имеет гетерогенный состав, зависящий от состава электролита и скорости охлаждения.

Ключевые слова: гарнисаж, настыль, алюминиевый электролизер, криолитовое отношение, температура ликвидуса, форма рабочего пространства.

Иванова А.М. - канд. техн. наук, директор научно-технического центра «Элтер»

(660025, г. Красноярск, ул. Шелковая, 10). E-mail: eletrk@yandex.ru.

Архипов П.А. – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории электродных процессов ИВТЭ УрО РАН (620990, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20). E-mail: arh@ihte.uran.ru.

Руденко А.В. – аспирант, науч. сотр. лаборатории пирохимических процессов и электрохимических технологий ИВТЭ УрО РАН. E-mail: a.rudenko@ihte.uran.ru.

Ткачева О.Ю. – докт. хим. наук, зав. лабораторией электродных процессов ИВТЭ УрО РАН, профессор кафедры технологии электрохимических производств УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: o.tkacheva@ihte.uran.ru.

Зайков Ю.П. – докт. хим. наук, науч. руководитель ИВТЭ УрО РАН, зав. кафедрой электрохимических производств УрФУ. E-mail: zaikov@ihte.uran.ru.

Для цитирования: Иванова А.М., Архипов П.А., Руденко А.В., Ткачева О.Ю., Зайков Ю.П. Формирование гарнисажа и настыли в алюминиевом электролизере. Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2019. No. 5. C. 23–31. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-5-23-31.

Ivanova A.M., Arkhipov P.A., Rudenko A.V., Tkacheva O.Yu., Zaikov Yu.P. **Formation of ledge in aluminum electrolyzer**

A model unit simulating the actual conditions of electrolytic aluminum production was used to conduct an experimental study of ledge to determine its dynamic behavior (formation/dissolution) depending on the electrolyte overheating temperature, lining thermal resistance and cryolite-alumina electrolyte composition. A window was mounted in the front wall of the unit housing to change the

Металлургия цветных металлов

lining material. Ledge is formed due to the heat flow generated by the temperature difference between the electrolyte and electrolyzer walls. The electrolyte cryolite ratio (CR) varied in the range of 2.1-2.5. The alumina concentration in the electrolyte did not exceed 4.5 wt.%. Shape change in the electrolyzer working space during electrolysis was determined by the thickness of the formed ledge on the walls and bottom. The dynamic ledge formation in the experimental cell begins at the overheating of 3-4 degrees. It was found that with a decrease in the thermal resistance of the lining material from 16 to $14 \text{ m}^2/\text{W}$ at the same overheating temperature, the side ledge with a greater thickness was formed, however, the decrease in the thermal resistance hardly affected its thickness when the ledge has been already formed. As in the industrial electrolyzer, the ledge profile formed in the experimental cell can be conditionally divided into three zones: bottom ledge, metal/electrolyte interface ledge and side ledge. The dynamic behavior of the side ledge was different from the bottom ledge: the higher the CR, the thicker the side ledge and the thinner the bottom ledge. Chemical analysis of components in the dry knockout showed that the CR and Al₂O₃ concentration increase throughout the cell height from top to bottom. It was concluded that the side ledge has a heterogeneous composition depending on the electrolyte composition and cooling rate.

Keywords: side ledge, bottom ledge, aluminum electrolyzer, cryolite ratio, liquidus temperature, working space shape.

Ivanova A.M. – Cand. Sci. (Tech.), head of the Scientific and Technical Centre «Elter» (660025, Russia, Krasnoyarsk, Shelkovaya str., 10). E-mail: eletrk@yandex.ru.

Arkhipov P.A. – Cand. Sci. (Chem.), senior researcher of Laboratory of the electrode processes of the Institute of High Temperature Electrochemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS) (620990, Russia, Yekaterinburg, Akademicheskaya str., 20). E-mail: arh@ihte.uran.ru.

Rudenko A.V. – postgraduate student, research scientist of Laboratory of pyrochemical processes and electrochemical technologiesm, IHTE UB RAS. E-mail: a.rudenko@ihte.uran.ru.

Tkacheva O.Y. – Dr. Sci. (Chem.), head of Laboratory of the electrode processes of IHTE UB RAS, professor of the Department of electrochemical production technology of the Ural Federal University (UrFU) n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: o.tkacheva@ihte.uran.ru.

Zaikov Yu.P. – Dr. Sci. (Chem.), scientific head of the IHTE UB RAS, head of the Department of electrochemical production technology of the UrFU. E-mail: zikov@ihte.uran.ru.

Citation: *Ivanova A.M., Arkhipov P.A., Rudenko A.V., Tkacheva O.Yu., Zaikov Yu.P.* Formation of ledge in aluminum electrolyzer. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2019. No. 5. P. 23–31 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-5-23-31.

Введение

Пуск алюминиевого электролизера предусматривает максимально быстрый вывод электролизных ванн в работу с минимальными потерями энергетических ресурсов. В публикациях [1-3] отмечено, что повреждения, наносимые подине при пуске и в послепусковой период ее работы, являются причиной преждевременной остановки ванн. Вместе с тем во время пуска необходимо обеспечить плавный переход к стационарному режиму работы с плановой производительностью в течение всего срока службы электролизера [4]. Быстрое формирование защитной настыли и гарнисажа в период пуска электролизера должно привести к сокращению длительности послепускового периода, позволит снизить напряжение на электролизере и в целом уменьшит удельный расход электроэнергии.

В период пуска происходит интенсивная пропитка футеровки компонентами электролита с заполнением открытой пористости блоков, которая может варьироваться от 13 до 24 % [5]. Считается, что в период пуска необходимо использовать электролит с более высоким криолитовым отношением (КО), чем рабочий электролит, т.е. электролит с более высокой температурой ликвидуса. Тем не менее состав электролита в пусковой период на предприятиях алюминиевой промышленности является предметом коммерческой тайны [4].

Формирование гарнисажа — сложный физико-химический процесс, который определяется тепловым потоком, направленным от электролита к стенкам электролизера. Гарнисаж защищает стенки ванны от химически агрессивных электролита и расплавленного металла, регулирует тепловой баланс ванны, влияет на распределение силовой нагрузки в электролизере [6].

Вопросами теплового баланса в электролизной ванне и влияния теплового потока на формирование гарнисажа в течение нескольких десятков лет занимались норвежские ученые [7—13]. В работе [9] приводится уравнение теплового потока, направленного от электролита к гарнисажу и от гарнисажа через стенки ванны:

$$q = k(\theta_{\infty} - \theta_{\text{liq}}), \tag{1}$$

где k — коэффициент теплопереноса, Вт·м⁻²·K⁻¹; θ_{∞} — температура электролита; θ_{liq} — температура

Металлургия цветных металлов

ликвидуса, К. Сделан вывод, что величина коэффициента теплопереноса на границе электролит/ гарнисаж не влияет на термическую стойкость системы, но важна толщина гарнисажа. Авторы [9] отмечают, что выражение (1) справедливо для двухфазной границы гарнисаж/электролит и трехфазной границы гарнисаж/электролит/металл, однако для зоны настыль/металл его использовать нельзя, поскольку алюминий лучше проводит тепло, чем электролит, и коэффициент теплопередачи должен быть выше на порядок (теплопроводность металла — $100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, электролита — $0,8 \text{ Вт·м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Кроме того, металл имеет более низкое значение вязкости, чем электролит, поэтому скорости движения металла и электролита отличаются. Для того чтобы учесть разные коэффициенты теплопроводности, автор [14] предположил существование пленки электролита между металлом и настылью и предложил в уравнении (1) заменить коэффициент теплопереноса на коэффициент пропускания U. Однако, чтобы получить реальную величину $U = 800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, толщина этого слоя должна быть не менее 1 мм, что трудно объяснить. Автор [9] считает, что существование тонкого слоя электролита между гарнисажем и металлом можно признать, но его температура не может быть равной температуре ликвидуса электролита.

Математические модели, описывающие тепловые, диффузионные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями и поглощением или выделением теплоты, сводятся к решению теплофизической задачи Стефана. Как правило, эти модели нелинейны и трудны для анализа вследствие того, что границы фазовых переходов подвижны и заранее неизвестны [15—17]. Теоретические расчеты теплового потока также не могут учитывать многие факторы — например, скорость движения электролита на границе фаз или влияние газовыделения на аноде [18—20].

Провести экспериментальные исследования поведения гарнисажа (размеры, состав) в работающих промышленных ваннах практически невозможно. Известны работы по способам измерения формы рабочего пространства (ФРП) работающих электролизеров [21—23], но они предполагают проведение измерений механическими приспособлениями, вручную. Поэтому, как правило, для изучения динамического поведения гарнисажа прибегают к лабораторным исследованиям на установках, имитирующих условия реального электролиза. Целью настоящей работы являлось исследование динамического поведения (образования/растворения) настыли и гарнисажа в зависимости от температуры перегрева, теплового сопротивления материала футеровки и состава криолит-глиноземного электролита с использованием опытной экспериментальной установки.

Методика исследования

В работе использовали лабораторную модельную установку (рис. 1), специально созданную для изучения динамического поведения настыли и гарнисажа.

В переднюю стенку корпуса печи было вмонтировано окно, позволяющее менять материал футеровки. «Холодная» зона на передней стенке создавалась за счет уменьшения теплового сопротивления материала футеровки. В процессе электролиза понижали температуру печи и регистрировали температуру электролита и передней стенки. Продолжительность каждого эксперимента составляла более 4 суток, включая нагрев ячейки и выдержку при заданной температуре.

Криолитовое отношение электролита (КО = $X_{\text{NaF}}/X_{\text{AIF}_3}$, мол./мол.) варьировали в интервале 2,1—2,5. Концентрация глинозема в электролите



Рис. 1. Схема установки для изучения динамического поведения настыли и гарнисажа

1 – анод (графит), 2 – защитный контейнер, 3 – термопары,
 4 – тигель (графит), 5 – печь, 6 – катод, 7 – механизм обмера толщины гарнисажа и настыли, 8 – уровень электролита,
 9 – уровень расплавленного алюминия

не превышала 4,5 мас.%. Содержание CaF₂ в исходном электролите составляло 5 мас.%. Уровень электролита в тигле поддерживали на высоте 190 мм от дна тигля. Уровень жидкого металла на дне тигля достигал 80 мм. Электролиз вели при плотности тока 0,5 A/cm², при этом напряжение на ячейке изменялось в интервале 3,4—3,8 В.

Измерение толщины образующихся настыли и гарнисажа на стенке тигля в ходе электролиза криолит-глиноземного расплава проводили механизмом обмера с шагом 2 см (см. рис. 1). Фиксируя профили настыли и гарнисажа в зависимости от времени, определяли динамику образования/растворения твердых слоев в зависимости от различных параметров.

В ходе электролиза отбирали пробы электролита для определения концентрации Al₂O₃ и KO. После окончания эксперимента проводили сухую выбойку образцов в различных точках ячейки. В пробах сухой выбойки определяли элементный состав Na, Al, Ca, O, по результатам которого рассчитывали концентрацию компонентов и КО в области формирования настыли и гарнисажа. Химический анализ на содержание Na, Al, Са проводили спектрально-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP) при помощи оптического эмиссионного спектрометра «iCAP 6300 Duo» («ThermoScientific», Швейцария). Анализ на кислород выполняли с помощью прибора «Анализатор кислорода ОNH836» фирмы LECO (США).

Результаты и их обсуждение

Влияние на ФРП температуры перегрева (Δt) электролита при электролизе расплава промышленного состава с КО = 2,48 и содержанием 5 мас.% CaF₂ и 4 мас.% Al₂O₃ (t_{lig} = 943 °C) показано на рис. 2.

При перегреве выше 30 °С в течение 2,4 ч гарнисаж не образуется, как и при снижении перегрева до 10 °С в течение 8 ч (рис. 2, *a*, кр. *I*). Кристаллизация начинается при выдержке при температуре перегрева 9 °С в течение 18 ч, толщина настыли и гарнисажа при этом одинаковая и составляет 3— 4 мм.

Активный рост гарнисажа начинается при снижении температуры перегрева (рис. 2, б и в). При перегреве 3—4 °С ФРП можно условно разделить на несколько зон: настыль — зона металл/твердый осадок; трехфазная граница металл/электролит/ гарнисаж; гарнисаж/электролит. При этом толщина настыли уменьшается к границе металл/ электролит/гарнисаж. Бортовой гарнисаж вырос до 22—24 мм, толщина его увеличивается по высоте и на границе с атмосферой значительно возрастает вследствие образования корки глинозема на поверхности электролита. Толщина настыли и гарнисажа увеличивается с понижением температуры электролита практически до температуры ликвидуса.

Влияние теплового сопротивления материала футеровки на образование гарнисажа и настыли в



Рис. 2. Влияние температуры перегрева (Δ*t*) электролита на форму рабочего пространства Δ*t*, °C (τ, ч): *a*: *I* – 10 (8,3), *Z* – 9 (18,10); *б*: *I* – 8 (20,35), *Z* – 4 (28,25), *3* – 4 (35,05); *s*: *I* – 5 (49,15), *Z* – 2 (57,05), *3* – 1 (62,05)

графическом виде представлено на рис. 3. При снижении теплового сопротивления с 16 до 14 К·м²/Вт при практически одной и той же температуре электролита происходит значительное увеличение толщины гарнисажа. Однако замечено, что уже при сформированном гарнисаже (рис. 3, δ) уменьшение теплового сопротивления практически не сказывается на толщине гарнисажа, но приводит к некоторому снижению толщины настыли. Как и в предыдущей серии экспериментов, из рис. 3 следует, что профиль гарнисажа имеет четко выраженные зоны.

Экспериментальные значения размеров формы рабочего пространства в зависимости от состава электролита (КО) и времени (т) приведены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, *a*, образовавшиеся в электролите с низким KO = 2,09 настыль и гарнисаж имеют разную толщину. При более длительной выдержке при этом же KO наблюдается некоторый рост гарнисажа во всех зонах. При добавлении NaF, т.е. при увеличении KO, происходит обратимый процесс растворения гарнисажа. При более высоком KO (рис. 4, δ) геометрические размеры гарнисажа и настыли меньше, но все еще существенные. При выдержке около 65 ч толщина настыли составляет 5—7 мм, а гарнисажа — 8—10 мм с явно проявляющейся границей металл/электролит/гарнисаж и увеличением толщины в области корки. При более длительной выдержке (рис. 4, *б*, кр. *2* и *3*) профиль гарнисажа меняется незначительно.

Зависимость ФРП от КО электролита на разном уровне высоты от дна тигля показана на рис. 5.

Видно, что в области KO = $2,1\div2,2$ форма рабочего пространства остается практически неизменной, но затем, по мере роста KO, толщина бортового гарнисажа увеличивается. Настыль в этом же интервале KO также не меняется, но с повышением KO происходят растворение настыли и уменьшение ее толщины. Таким образом, влияние KO на толщину твердого осадка начинает сказываться при KO > 2,15, при этом чем выше KO электролита, тем больше толщина гарнисажа и меньше толщина настыли.

Время начала образования гарнисажа в зависимости от КО электролита приведено на рис. 6. Точки 1 получены при электролизе криолит-глиноземного расплава в условиях принудительной конвекции электролита, которая создавалась вращением анода со скоростью 0,5 об/с. Точки 2 получены в опытах без вращения анода. Во всех экспериментах поддерживался перегрев 10 ± 2 °C.

Согласно рис. 6, гарнисаж образуется раньше в ячейках без принудительной конвекции. Однако и в первом, и во втором случаях сохраняется тенденция более быстрого начала образования гарнисажа в электролитах с более высоким КО.



Рис. 3. Влияние теплового сопротивления футеровки на форму рабочего пространства *a*: *I* – 16 К·м²/Вт, 957 °С, 9,45 ч; *2* – 14 К·м²/Вт, 955 °С, 16,45 ч; *3* – 14 К·м²/Вт, 955 °С, 28,25 ч *б*: *I* – 12 К·м²/Вт, 955 °С, 28,25 ч; *2* – 10 К·м²/Вт, 947 °С, 42,10 ч



Рис. 4. Влияние КО электролита на формирование/растворение гарнисажа и настыли *a*: *I* – KO = 2,09 (т = 72,20 ч); *2* – 2,09 (77,40 ч); *3* – 2,15 (69,20 ч) *6*: *I* – 2,28 (64,50 ч); *2* – 2,28 (71,55 ч); *3* – 2,28 (78,45 ч)



Рис. 5. Зависимость формы рабочего пространства от криолитового отношения по высоте электролизера Расстояние от дна тигля, мм: *1* – 60, *2* – 140, *3* – 220

После остановки эксперимента ячейку охлаждали до комнатной температуры и производили сухую выбойку. Фотография сухой выбойки представлена на рис. 7, схема отбора проб — на рис. 8.

В таблице приведен состав образцов выбойки, рассчитанный по результатам элементного химического анализа. КО образцов меняется от 1,81 до 3,07 и зависит от места отбора пробы. Наибольшие значения КО наблюдались на границе алюминий—электролит в центральной части под торцевой поверхностью анода.

Химический состав осадков зависит от их расположения. Градиент КО по высоте ячейки сверху



Рис. 6. Зависимость времени начала образования гарнисажа от КО

Скорость вращения анода, об/с: 1 - 0.5; 2 - 0

вниз (см. рис. 8) можно объяснить миграцией катионов натрия к катоду. Так же как и в промышленных ваннах, в лабораторной ячейке был обнаружен осадок под слоем алюминия, отмечены повышенное содержание глинозема в настыли и градиент концентрации глинозема сверху вниз по ванне.

Плавление или замораживание гарнисажа приводит к изменению состава электролита вблизи гарнисажа по сравнению с его составом в объеме. Во время замораживания компонент электролита, который не входит в состав гарнисажа, будет нака-

№ пробы	Характеристика	AlF ₃	NaF	CaF ₂	КО	Al ₂ O ₃
1	Электролит после охлаждения	38,55	49,33	5,67	2,56	3,8
2	Электролит в области задней стенки на границе с алюминием	37,04	51,15	6,26	2,76	_
3	Электролит в области передней стенки на границе с алюминием	38,37	50,68	5,81	2,64	5,6
4	Гарнисаж, задняя стенка (1-я половина тигля)	42,87	46,79	5,41	2,18	_
5	Граница алюминий/электролит, центр	35,19	54,04	5,32	3,07	5,2
6	Гарнисаж, передняя стенка на расстоянии от алюминия 20–50 мм	39,08	49,05	6,21	2,51	4,9
7	Гарнисаж, передняя стенка на расстоянии выше 50 мм от алюминия	40,25	48,71	5,96	2,42	_
8	Гарнисаж, передняя стенка на расстоянии 20 мм от алюминия	40,93	48,58	5,37	2,37	4,4
9	Граница электролит/гарнисаж	38,76	50,16	6,04	2,59	4,2
10	Гарнисаж, передняя стенка (2-я половина тигля)	42,11	47,93	5,07	2,28	_

Состав образцов выбойки, рассчитанный по результатам элементного химического анализа (мас.%)



Рис. 7. Разрез ячейки после охлаждения (половина тигля)

пливаться на его поверхности и диффундировать обратно в ванну, концентрации AlF_3 , CaF_2 и Al_2O_3 увеличиваются вблизи гарнисажа, а температура ликвидуса снижается.

Формирование гарнисажа начинается при температурах ниже температуры ликвидуса электролита. Образующаяся твердая фаза на холодной стенке представляет собой криолит. По мере роста твердой фазы происходит захват жидкого электролита, содержащего фторид кальция и растворенный глинозем. Кроме того, в гарнисаж могут попадать твердые частички нерастворенного глинозема. Таким образом, гарнисаж имеет гетерогенный состав, зависящий от состава электролита и скорости охлаждения.

Моделирование роста дендритных кристаллов во время быстрого охлаждения при перегреве 10 °C проведено в работе [10]. Был сделан вывод, что если перегрев выше 7 °C, то образуется чистый криолит или твердый раствор, содержащий небольшие количества AlF₃ и CaF₂. При перегреве менее 7 °C содержание в гарнисаже AlF₃, CaF₂ и Al₂O₃ начинает резко увеличиваться.

В работе [7] сообщается, что при быстром охлаждении электролита промышленного состава в лабораторной ячейке был получен пористый бе-



Рис. 8. Схема отбора и номера проб (от 1 до 9) с указанием КО (выделено курсивом)

лый слой гарнисажа. Эти же авторы [24] указывают на то, что переход состава гарнисажа от чистого криолита до рабочего электролита имеет место в очень узком температурном диапазоне, что можно объяснить пористой структурой, наблюдаемой в образцах промышленного гарнисажа.

Заключение

На модельной установке, имитирующей реальные условия электролитического получения алюминия, проведено экспериментальное исследование динамического поведения настыли и гарнисажа в зависимости от температуры перегрева, теплового сопротивления материала футеровки и состава электролита.

Так же как и в промышленном электролизере, профиль гарнисаж—настыль, сформированный в экспериментальной ячейке, можно условно разделить на три зоны: 1 — настыль на дне в контакте с жидким алюминием; 2 — гарнисаж на границе металл/электролит; 3 — гарнисаж на уровне электролита. Стабильность гарнисажа зависит от теплового потока, идущего от центра ванны к стенкам электролизера, и это справедливо для зон 2 и 3, но не для зоны 1. Активное образование гарнисажа в экспериментальной ячейке начинается при перегреве 3—4 °С и продолжается до тех пор, пока рабочая температура и температура ликвидуса не выровняются.

Образование или расплавление настыли происходит медленно, и ее динамическое поведение отличается от поведения гарнисажа: при увеличении КО электролита толщина бортового гарнисажа растет, а настыли — уменьшается, при этом сохраняется тенденция более быстрого начала образования гарнисажа в электролитах с более высоким КО.

Литература/References

 Сизяков В.М., Фещенко Р.Ю., Бажин В.Ю., Патрин Р.К., Сизяков В.М. Особенности разрушения подины высокоамперного электролизера. Новые огнеупоры. 2013. No. 5. C. 5–8.

Sizyakov V.M., Feshchenko R.Yu., Bazhin V.Yu., Patrin R.K., Sizyakov V.M. Features of the high-current electrolyzer bottom destruction. *Novye ogneupory.* 2013. No. 5. P. 5– 8 (In Russ.).

- 2. *Yin E., Liu Y., Xi C., Zhang J.* Developing the GP-320 cell technology in China. *Light Metals.* 2001. P. 213–218.
- 3. Zeng S. Analysis of the start-up of Q-350 prebaked aluminium reduction cell. *Light Metals.* 2006. P. 271–275.
- Kvande H. Preheating, start-up and early operation of Hall-Heroult cells. In: 10th Intern. course on process metallurgy of aluminium (Trondheirn, Norway, 1991). P. 15–48.
- Sorlie M., Oye H. Cathodes in aluminium electrolysis.
 3-rd ed. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation, 2010.
- 6. *Vallea A., Lenis V.* Prediction of ledge profile in Hall-Heroult cells. *Light Metals.* 1995. P. 309–313.
- Thonstad J., Rolseth S. Equilibrium between bath and side ledge in aluminium cells. Basic principle. *Light Metals*. 1983. P. 415–425.
- 8. *Thonstad J., Solheim A.* Heat transfer coefficients between bath and side ledge. *Light metals.* 1983. P. 425–435.
- Solheim A. Towards the proper understanding of sideledge facing the metal in aluminum cells? *Light Metals*. 2006. P. 439–443.
- Solheim A. Some aspects of heat transfer between bath and sideledge in aluminum reduction cells. *Light Metals*. 2011. P. 381–386.
- Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Støen L., Sterten A., Store T. Liquidus temperatures for primary crystallization of cryolite in molten salt systems of interest for the aluminium electrolysis. *Met. Trans. B.* 1996. Vol. 27B. P. 739–744.
- Solheim A. Crystallization of cryolite and alumina at the metal-bath interface in aluminium reduction cells. *Light Metals.* 2002. P. 225–230.

- 13. *Peacey J.G., Medlin G.W.* Cell sidewall studies at Noranda Aluminium. *Light Metals.* 1979. P. 475–480.
- 14. *Haupin W.E.* Calculating thickness of containing walls frozen from melt. *JOM*. 1971. Vol. 23. No. 7. P. 41–44.
- Данилюк И.И. О задаче Стефана. Успехи матем. наук. 1985. Т. 40. Вып. 5. С. 133—185.
 Danilyuk I.I. About the Stefan task. Uspekhi matematicheskikh nauk. 1985. Vol. 40. Iss. 5. P. 133—185 (In Russ.).
- Самарский А.А., Вабищевиц П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. Samarskii A.A., Vabishchevits P.N. Computational heat transfer. Moscow: Editorial URSS, 2003 (In Russ.).
- Слепцов С.Д., Рубцов Н.А. Решение классической однофазной задачи Стефана в модифицированной постановке для полупрозрачных сред. Прикл. механика и техн. физика. 2013. Т. 54. No. 3. С. 106—113. Sleptsov S.D., Rubtsov N.A. Solving the classical single-phase Stefan problem in a modified formulation for semi-transparent media. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2013. Vol. 54. No. 3. P. 106—113 (In Russ.).
- Marios M., Bertrand C., Desilets M., Coulombe M., Lacroix M. Comparison of two different numerical methods for predicting the formation of the side ledge in an aluminum electrolysis cell. Light Metals. 2009. P. 563–568.
- Severo D., Gusberti V. A modeling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficient. *Light Metals*. 2009. P. 557–562.
- 20. Poncsak S., Kiss L., Belley A., Guerard S., Bilodeau J.-F. Study of the structure and thermophysical properties of

the side ledge in Hall-Heroult cells operating with modified bath composition. *Light Metals.* 2015. P. 655–660.

- 21. Ситников А.В., Ершов В.А., Сысоев И.А. Способы измерения рабочего пространства при производстве алюминия. В сб.: Научные тенденции: вопросы точных и технических наук: Сб. науч. тр. по материалам VII междунар. науч. конф. Самара, 2017. С. 43—47. Sitnikov A.V., Ershov V.A., Sysoev I.A. Ways of measure of the working space in the production of aluminum. In: Scientific trends: questions of exact and technical sciences: Nauchnye trudy VII mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Samara, 2017. P. 43—47 (In Russ.).
- 22. Ситников А.В., Ершов В.А., Сысоев И.А. Лабораторные испытания макета для измерения формы рабочего пространства. В сб.: International innovation research: Сб. ст. XII Междунар. науч.-практич. конф. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. С. 101—104. Sitnikov A.V., Ershov V.A., Sysoev I.A. Laboratory test of the layout for measure the shape of the working space. In: International innovative research: Sbornik statei XII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Penza: MTsNS «Nauka i prosveshchenie», 2018. P. 101— 104 (In Russ.).
- 23. Jianfei Z., Dupuis M., Feiya Y., Xiaobing Y., Jun H. Depth analysis and potentiality exploitation on energy-saving and consumption-reduction of aluminum reduction pot. *Light metals.* 2012. P. 601–606.
- Solheim A., Thonstad J. Model experiments of heat transfer coefficients between bath and side ledge in aluminium cells. *Metals.* 1984. Vol. 36. P. 51–55.