



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22
УДК 669.713

Научная статья / Research article

Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия

Ю.А. Морозов^a  , В.С. Ялунин^b 

^aМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

^bМосковский политехнический университет (Московский Политех), Москва, Российская Федерация
 akafest@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 января 2022 г.

Доработана: 15 марта 2022 г.

Принята к публикации: 25 марта 2022 г.

Ключевые слова:

алюминий, электролизер, электрометаллургия, углеродный след, анод Содерберга, инертный анод

Аннотация. Анализируется традиционная и перспективная электролитическая технология получения металлического алюминия с точки зрения экологичности производства. Дается краткая характеристика использования электролизеров с анодом Содерберга и предварительно обожженных анодов, объединяемых общим углеродным анодным материалом, окисляемым в газообразный оксид и диоксид углерода при восстановлении алюминия. С целью снижения (исключения) углеродного следа предлагается концепция инертного анода, материал которого не вступает в реакцию восстановления алюминия, а значит, не расходуется (почти), при этом допускается высвобождение кислорода в статусе конечного газообразного «отхода». Базой для разработки принимается электролизер с самообжигающимся анодом Содерберга типа С-8БМ, характеризующий наиболее старую технологию и широко представленный в России. В результате сопоставления условий эксплуатации и технологических возможностей получения анодов подобных размеров из композитных и керамических материалов (керметов) при замещении углеродного анодного массива решено использовать классический медно-никелевый сплав МНМц43-0,5, имеющий минимальное содержание железа (снижающее сортность алюминия) и характеризующийся термической стабильностью при температуре электролиза. На основании электрических характеристик базового процесса и с учетом рекомендаций профильных специалистов «Лаборатории РУСАЛА» устанавливаются размеры металлического инертного анода и даются рекомендации по реконструкции вышеобозначенного электролизера при переходе на новую технологию получения алюминия.

Для цитирования

Морозов Ю.А., Ялунин В.С. Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 15–22.
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22>

© Морозов Ю.А., Ялунин В.С., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Inert anode technology in the concept of green aluminum metallurgy

Yury A. Morozov^a , Vladimir S. Yalunin^b 

^aBauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russian Federation

^bMoscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ akafest@mail.ru

Article history

Received: January 5, 2022

Revised: March 15, 2022

Accepted: March 25, 2022

Keywords:

aluminum, electrolyzer, electrometallurgy, carbon footprint, Soderberg anode, inert anode

Abstract. An analysis is made of the traditional and advanced electrolytic technology for producing metallic aluminum from the point of view of environmental friendliness of production. A brief description is given of the use of Soderberg anode cells and pre-baked anodes combined by a common carbon anode material oxidized into gaseous oxide and carbon dioxide during aluminum reduction. In order to reduce (eliminate) the carbon footprint, the concept of an inert anode is proposed, the material of which does not enter into the aluminum reduction reaction, and therefore is not consumed (almost), while the release of oxygen in the status of the final gaseous “waste” is allowed. The basis for the development is an electrolytic cell with a self-baking Soderberg anode of the S-8BM type, which characterizes the oldest technology and has a large geography of representation in Russia. As a result of comparing the operating conditions and technological possibilities for obtaining anodes of similar sizes from composite and ceramic materials (cermets) when replacing the carbon anode array, it was decided to use the classic copper-nickel alloy CuNi44Mn1, which has a minimum iron content (reducing the grade of aluminum) and characterized by thermal stability at electrolysis temperature. Based on the electrical characteristics of the basic process and taking into account the recommendations of “RUSAL Laboratory” specialists, the dimensions of the metal inert anode are determined and recommendations are given for the reconstruction of the above-mentioned electrolyzer when switching to a new aluminum production technology.

For citation

Morozov YuA, Yalunin VS. Inert anode technology in the concept of green aluminum metallurgy. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):15–22. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22>

Введение

Алюминий сегодня незаменим ввиду сочетания легкости, прочности и, что немаловажно, стоимости относительно альтернативных металлов (например, магния или титана в авиации). Крупнейшие мировые производители алюминия (около 63 % всего мирового производства) – США, Россия, Канада, Китай, Австралия и Бразилия [1]. В России крупным поставщиком металлического алюминия является объединенная компания «Русский алюминий» (ОК «РУСАЛ»), производящая более 2,42 млн т первичного алюминия и конечной продукции из него. Профильные заводы ОК «РУСАЛ» по большей части расположены на территории Урала (Богословский, Уральский) или Сибири (Богучанский, Братский, Иркутский, Красноярский, Саяногорский, Тайшетский, Хакасский),

что связано с высокой энергоемкостью процесса, требующего мощных и дешевых источников электроэнергии, и обусловлено технологией его электролитического получения.

1. Цель

В настоящее время выявился существенный недостаток классической электролизной технологии, проявившийся с точки зрения экологичности и мирового квотирования карбоновых выбросов (углеродный след). При этом основным токоподводящим элементом является углерод в различном исполнении соответствующего анодного узла.

С начала 30-х гг. XX в. в электрометаллургии начали внедряться непрерывные самообжигающиеся электроды по патенту Содерберга, представляющие собой анодный массив из коксо-

пековой композиции, ограниченной алюминиевой рубашкой, в виде крупных брикетов нефтяного прокаленного кокса (67–69 %), где связующим элементом выступает каменноугольная смола – пек (рис. 1, а) [2; 3].

Несколько модернизированной технологией (в плане удобства) является использование предварительно обожженных угольных блоков, последовательно устанавливаемых в электролизер в требуемом количестве (рис. 1, б).

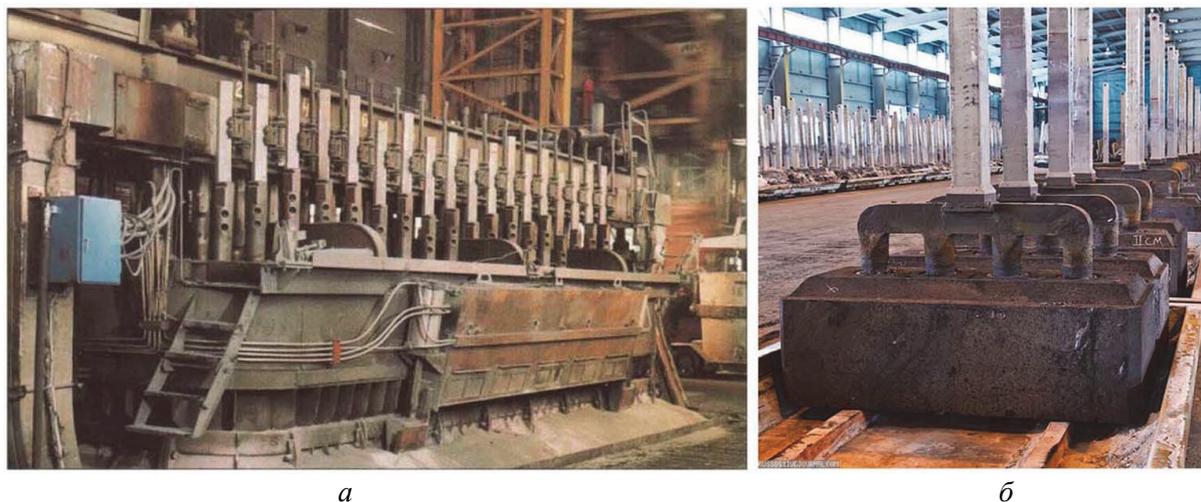


Рис. 1. Электролизер с анодом Содерберга (а) и предварительно обожженные аноды (б)
Figure 1. Soderberg anode electrolyzer (а) and pre-baked anodes (б)

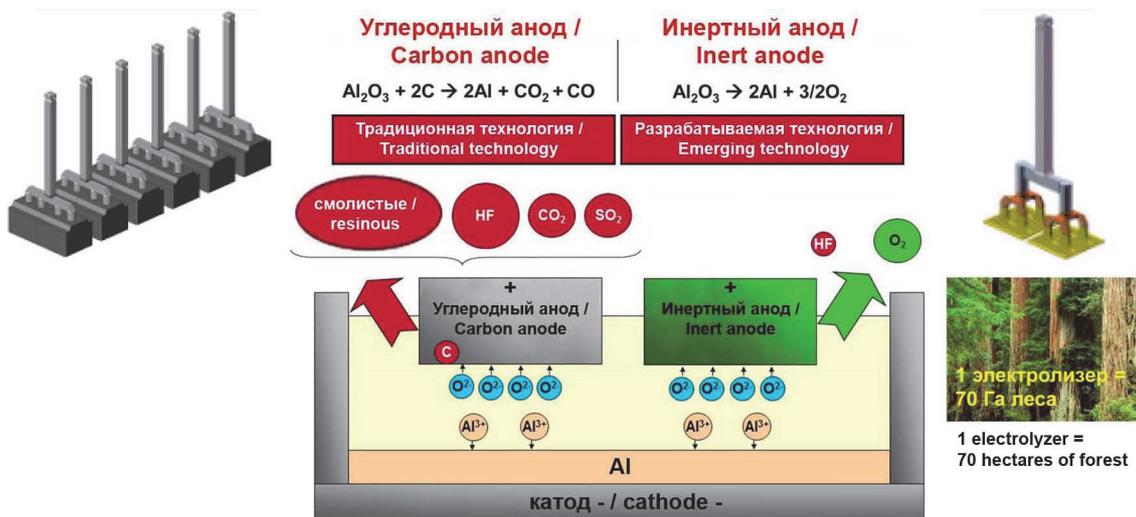
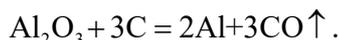


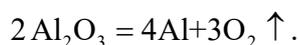
Рис. 2. Сравнение технологий электролиза с угольным и инертным анодом
Figure 2. Comparison of electrolysis technologies with coal and inert anode

Можно сказать, что все производство алюминия в России основано на реализации этих двух технологий в разных вариациях (имеются попытки внедрения экологичного Содерберга (ЭкоСодерберг) на КрАЗе, ключевым отличием которого является повышенная газоочистка и уменьшение содержания каменноугольной смолы – сухой анод) [4–6].

Использование углерода в качестве токоподводящего анода является экономически выгодным ввиду дешевизны, однако процесс восстановления алюминия приводит к ионообменной реакции соединения углерода с высвобождаемым кислородом и выделению на подошве угольного анода – анодных газов (оксид и диоксид углерода – угарный и углекислый газы), удаляемых в атмосферу



Объем углеродных выбросов можно оценить быстротой расходования углеродных анодов (производство 1 т алюминия требует 500–700 кг анодной массы Содерберга). Конечно, не весь углерод переходит в газообразное состояние, частично происходит его осыпание с науглероживанием электролита, но объемы выбросов все равно впечатляют. Не принимая в расчет выбросы углекислого газа при выработке электроэнергии, на восстановление тонны алюминия выделяется до 11 т $\text{CO} + \text{CO}_2$. Поэтому актуально создание *инертного анода*, материал которого не вступает в ионообменную реакцию восстановления алюминия, а значит, почти не расходуется, при этом допускается высвобождение кислорода в статусе конечного газообразного «отхода», эквивалентного 0,9 т кислорода O_2 на 1 т алюминия (одна ванна может производить кислород эквивалентно 70 Га леса), рис. 2 [7–15].



Исследования данного направления ведутся с 80-х гг. XX в., но в силу специфичности требований и условий эксплуатации до сих пор нет какого-либо широкого применения подобной экологичной технологии. Значительный разогрев ванны требует термической стабильности до 1000 °С, должны обеспечиваться нерастворимость, достаточно высокая механическая прочность, малая стоимость и легкость в изготовлении и пр. Важным условием является недопустимость содержания железа в составе анода, так как понижается сортность алюминия.

2. Материалы и методы

В рамках проектной работы, организованной лабораторией РУСАЛа, была предложена концепция зеленого анода на базе электролизера с самообжигающимся анодом Содерберга типа С-8БМ.

Данный выбор обусловлен тем, что подобные электролизеры характеризуют наиболее старую технологию, значительно распространены в России и их модернизация путем замещения углеродного анодного массива инертным анодом эко-

номически целесообразней в сравнении с разработкой нового поколения оборудования.

При замещении углеродного анодного массива решено использовать классические литейные металлические сплавы с проведением аналитического исследования электрических характеристик материалов в условиях, приближенных к электролизному производству.

Исследование показало большую неоднозначность электрического сопротивления, определяемого совокупностью используемых марок угля, объемной доли их смешивания, степени готовности и крупности, так как образовавшийся из угля полукокс начинает существенно менять свое электросопротивление (проводить электрический ток) при прямом влиянии температуры (рис. 3) [16].

Выбор металлического анода в первую очередь определяется его заранее запланированными свойствами. Так, с точки зрения жаростойкости используется никель, а основным материалом электротехнических изделий является медь, образующие твердофазные растворы неограниченной растворимости (рис. 4).

Рассматривая стандартные медно-никелевые сплавы, можно рекомендовать к использованию сплав МНМц43-0,5, имеющий минимальное содержание железа (до 0,15 %) и характеризующийся термической стабильностью при температуре плавления ~ 1290 °С, что будет достаточным в условиях электролиза ~ 950 °С¹.

Основным условием ОК «РУСАЛ» является ограничение снижения силы тока – не ниже 140 кА! Иными словами, электрические характеристики проектного металлического анода численно должны соответствовать базовому углеродному аноду.

При рабочем токе $I = 185$ кА наиболее распространенного на заводах России электролизера Содерберга с анодом типа С-8БМ согласно закону Ома рассчитывается электросопротивление в заданном интервале силы тока с учетом расчетного падения напряжения на аноде $\Delta U_a = 593$ мВ (рис. 5)

$$R_a^m \equiv R_a^{\text{угл}} = \frac{\Delta U_a}{I} = \frac{593 \times 10^{-3}}{(140 - 185) 10^3} \approx \\ \approx (4,236 - 3,205) 10^{-6} \text{ Ом.}$$

¹ Медно-никелевый сплав // Марочник стали и сплавов. URL: http://splav-kharkov.com/choose_mat.php?class_id=61 (дата обращения: 20.04.2022).

Проделанные электрические расчеты базируются на габаритных размерах металлического анода, и с учетом его большей в 100 крат электропроводности для исключения короткого замыкания на малом электросопротивлении электролита (криолитоглиноземный расплав) в цепь анодных стержней включаются дополнительные резистивные элементы, устанавливающие электрический баланс относительно базового углеродного анодного массива.

При разработке концепции инертного анода принято его горизонтальное положение из соображений максимальной поверхности контакта с электролитом.

Сам анод принимается наборным, состоящим из четырех пластин, заполняющих существующую площадь металлической анодной рубашки электролизера Содерберга, которую в свою очередь допускается демонтировать, так как с ис-

ключением углеродного анода она утрачивает свою функцию формирования анодной массы из коксо-пековой композиции.

Вместо нее на ванне устанавливается балка-коллектор электромеханического привода вертикального перемещения опорных стержней токовода каждой анодной пластины по четырехточечной схеме для исключения поперечных перекосов (рис. 6).

Ввиду работы металлического анода в условиях значительной температуры электролиза предусматривается его охлаждение, которое можно реализовать по двум схемам.

В первом случае осуществляется принудительное водяное охлаждение трубчатыми холодильниками, напаянными на внешнюю поверхность, с подачей охлаждающей жидкости гибкой подводкой со стороны балки-коллектора.

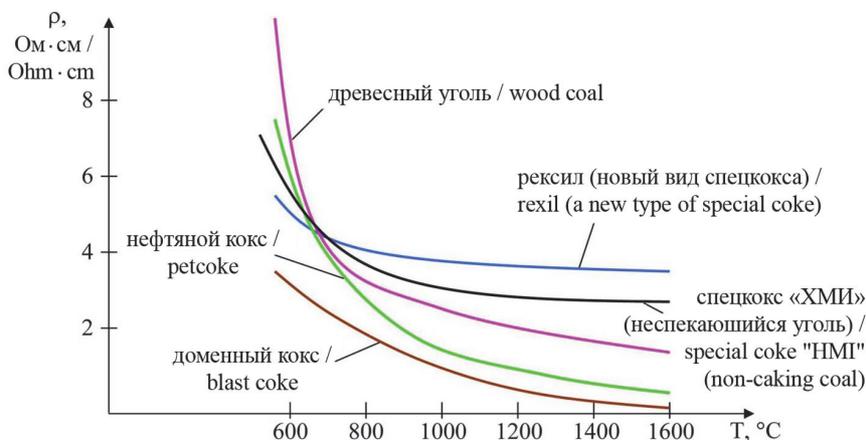


Рис. 3. Зависимость электросопротивления углей от температуры [17]
Figure 3. The dependence of the electrical resistance of coals on temperature

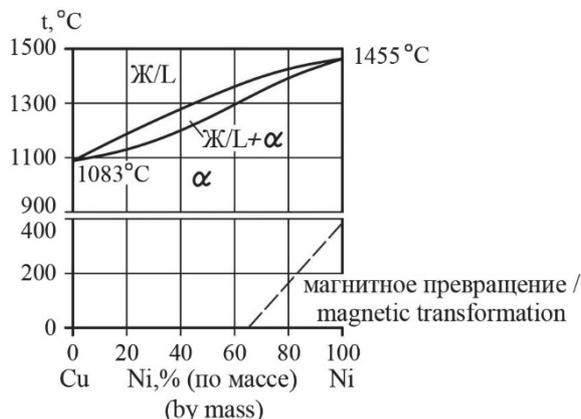


Рис. 4. Диаграмма состояния системы «медь – никель» (Cu-Ni)
Figure 4. Diagram of the state of the system “copper – nickel” (Cu-Ni)

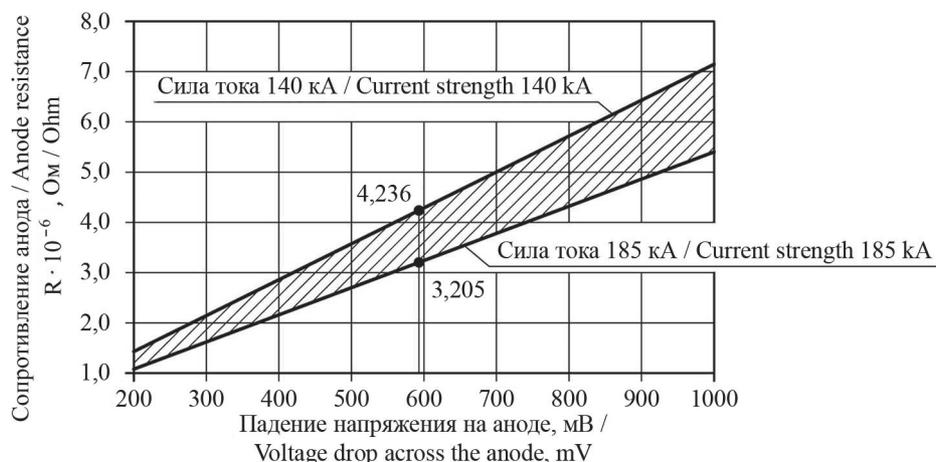


Рис. 5. Допустимый разброс сопротивления проектного металлического анода
Figure 5. Permissible spread of resistance of the design metal anode

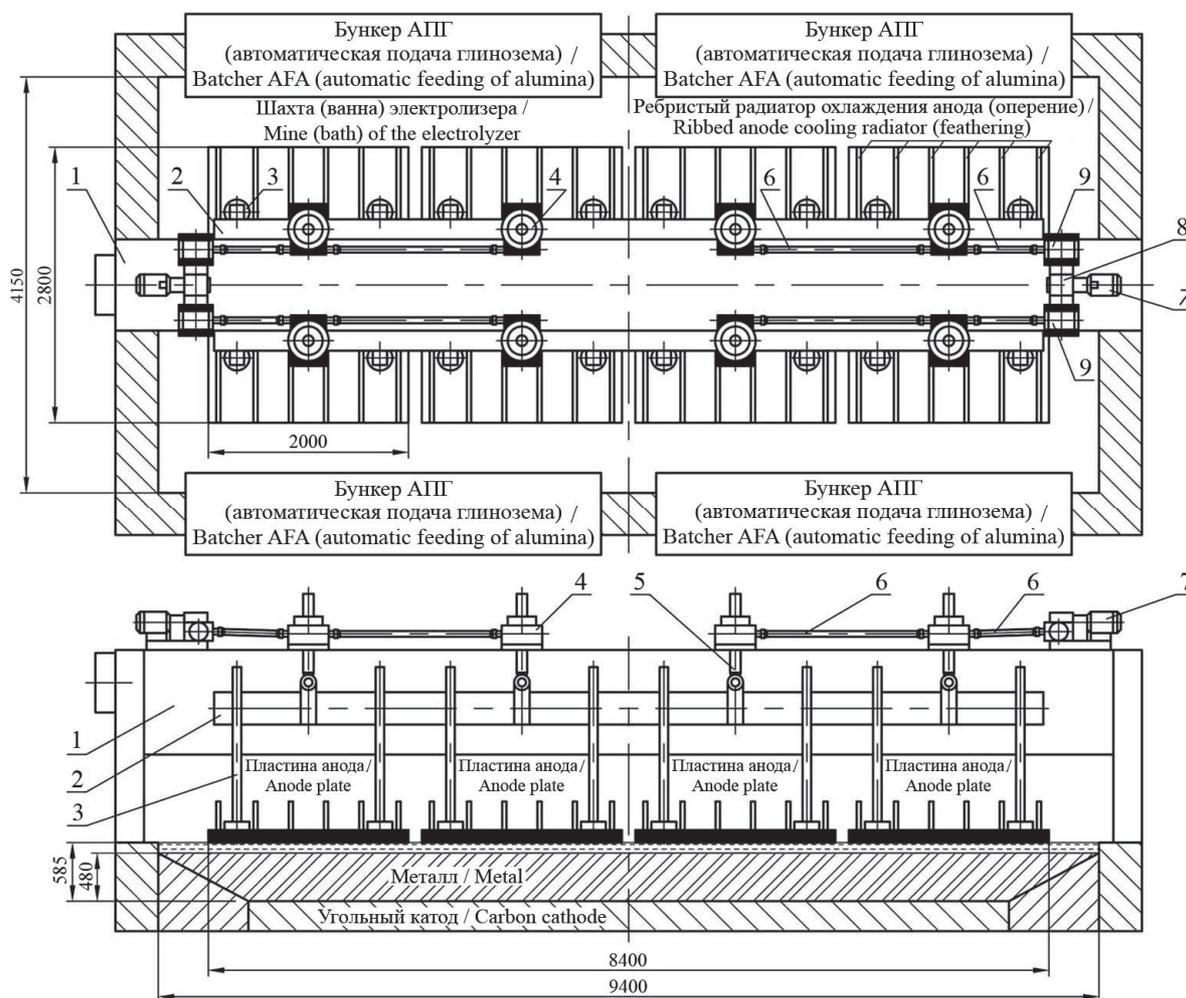


Рис. 6. Концепция металлического инертного анода (размещение электропривода по торцам коллектора):

1 – балка-коллектор; 2 – анодная ошиновка; 3 – аноды; 4 – винтовые домкраты;
 5 – винт домкрата; 6 – карданный вал; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор червячный; 9 – редуктор конический
Figure 6. The concept of a metal inert anode (placement of the electric drive at the ends of the collector):
 1 – beam-collector; 2 – anode busbar; 3 – anodes; 4 – screw jacks;
 5 – screw of the jack; 6 – cardan shaft; 7 – electric motor; 8 – worm gearbox; 9 – bevel gearbox

Вторым вариантом может быть пассивное охлаждение ребристыми радиаторами, напаянными на внешнюю поверхность анодной пластины, что является более предпочтительным по причине сложности организации принудительного водяного охлаждения, а также вероятности аварийных ситуаций при попадании охлаждающей жидкости (вода, эмульсия) в нагретый электролит.

3. Результаты

Разработанная с учетом рекомендаций профильных специалистов «Лаборатории РУСАЛА» (2021) концепция металлического инертного анода допускает минимальные затраты при переходе к более прогрессивной технологии получения алюминия на базе имеющихся электролизеров Содерберга, модернизируемых путем замещения углеродного анодного массива наборными горизонтальными медно-никелевыми пластинами из сплава МНМц43-0,5 аналогичных размеров.

Заключение

Предложенный материал и концепция инертного анода соответствуют требуемым температурным и электрическим параметрам исследуемого процесса. Монометаллический медно-никелевый сплав МНМц43-0,5 имеет достаточную термическую стабильность в условиях электролиза алюминия (950 °С), а минимальное содержание железа в сплаве (до 0,15 %) позволяет производить металлический алюминий высокой сортности, то есть высокой конкурентноспособности. Кроме того, использование классических литейных металлических сплавов облегчает технологию формообразования пластины анода с применением процессов обработки давлением, например прокатка плиты требуемой ширины и толщины.

Список литературы

1. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. *Электрометаллургия алюминия*. Новосибирск: Наука, 2001. 176 с.
2. Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А., Галевский Г.В. *Электролизеры с анодом Содерберга и возможности их модернизации* // Цветные металлы. 2010. № 12. С. 49–52.
3. Бегунов А.И., Бегунов А.А. *Модернизация электролизных производств с использованием анодов Содерберга* // Цветные металлы. 2011. № 7. С. 45–49.
4. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. *Повышение эффективности укрытия электролизеров Содер-*

берга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>

5. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Pitercev N., Cherskikh I., Frizorger V. *Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 1)* // Light Metals. 2012. Pp. 743–748. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_128

6. Frizorger V., Mann V., Chuchuk E., Buzunov V., Marakushina E., Pitercev N., Cherskikh I., Gildebrandt E. *Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 2. EcoSoderberg Technology)* // Light Metals. 2012. Pp. 749–753. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_129

7. Xianxi W. *Aluminum electrolytic inert anode* // Inert Anodes for Aluminum Electrolysis. 2021. Pp. 23–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28913-3_3

8. Падамата С.К., Ясинский А.С., Поляков П.В. *Инертные аноды в алюминийной промышленности: обзор* // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. № 11 (1). С. 18–30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>

9. Du J., Wang B., Liu Y., Yao G.C., Fang Zh., Hu P. *Study on the bubble behaviour and anodic overvoltage of NiFe₂O₄ ceramic based inert anode* // Light Metals. 2015. Pp. 1193–1197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_200

10. Weiping P., Ying L., Jie G., Ruilong Z., Jianhong Y., Wangxing L. *Effect of La on the electrolysis performance of 46Cu-25Ni-19Fe-10Al metal anode* // Light Metals. 2014. Pp. 1301–1304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_217

11. Wang Z., Xue J., Feng L., Dai F. *Investigating the corrosion behaviors of Fe-Ni-Cr anode material for aluminum electrolysis* // Light Metals. 2014. Pp. 1315–1319. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_220

12. He H. *The metal phase selection of 10NiO-NiFe₂O₄-based cermet anodes for aluminium electrolysis* // Light Metals. 2014. Pp. 1321–1325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_221

13. Liu J.-Y., Li Zh.-Y., Tao Y.-Q., Zhang D., Zhou K.-Ch. *Phase evolution of 17(Cu-10Ni)-(NiFe₂O₄-10NiO) cermet inert anode during aluminum electrolysis* // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. No 3. Pp. 566–572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60752-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60752-8)

14. Lu J., Xia Z. *The corrosion performance of a binary Cu-Ni alloy used as an anode for aluminum electrolysis* // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 55–57. Pp. 7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.55-57.7>

15. Glucina M., Hyland M. *Laboratory scale testing of aluminium bronze as an inert anode for aluminium electrolysis* // Light Metals. 2005. Pp. 523–528.

16. Саранчук В.И., Ошовский В.В., Лавренко А.Т., Кошкарев Я.М. *Метод определения величины электрического сопротивления угля в зависимости от температуры* // Научные труды Донецкого национального

технического университета. Серия: Химия и химическая технология. Донецк: ДонНТУ, 2008. С. 138–143.

17. Ульева Г.А. Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 23 с.

References

1. Mincis MYa, Polyakov PV, Sirazutdinov GA. *Aluminum electrometallurgy*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2001. (In Russ.)

2. Mincis MYa, Sirazutdinov GA, Galevskij GV. Electrolyzers with Soderberg anode and possibilities of their modernization. *Tsvetnye Metally*. 2010;(12):49–52. (In Russ.)

3. Begunov AI, Begunov AA. Modernization of electrolysis production with Soderberg anodes. *Tsvetnye Metally*. 2011;(7):45–49. (In Russ.)

4. Vinogradov AM, Pinaev AA, Vinogradov DA, Puzin AV, Shadrin VG, Zorko NV, Somov VV. Improving the efficiency of sheltering soderberg electrolyzers. *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>

5. Buzunov V, Mann V, Chichuk E, Pitercev N, Cherskikh I, Frizorger V. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 1). *Light Metals*. 2012:743–748. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_128

6. Frizorger V, Mann V, Chuchuk E, Buzunov V, Marakushina E, Pitercev N, Cherskikh I, Gildebrandt E. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 2. EcoSoderberg Technology). *Light Metals*. 2012:749–753. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_129

7. Xianxi W. Aluminum electrolytic inert anode. *Inert Anodes for Aluminum Electrolysis*. 2021:23–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28913-3_3

8. Padamata SK, Yasinskiy AS, Polyakov PV. Progress of inert anodes in aluminium industry: review. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018;11(1):18–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>

9. Du J, Wang B, Liu Y, Yao GC, Fang Zh, Hu P. Study on the bubble behaviour and anodic overvoltage of NiFe₂O₄ ceramic based inert anode. *Light Metals*. 2015: 1193–1197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_200

10. Weiping P, Ying L, Jie G, Ruilong Z, Jianhong Y, Wangxing L. Effect of La on the electrolysis performance of 46Cu-25Ni-19Fe-10Al metal anode. *Light Metals*. 2014: 1301–1304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_217

11. Wang Z, Xue J, Feng L, Dai F. Investigating the corrosion behaviors of Fe-Ni-Cr anode material for aluminum electrolysis. *Light Metals*. 2014:1315–1319. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_220

12. He H. The metal phase selection of 10NiO-NiFe₂O₄-based cermet anodes for aluminium electrolysis. *Light Metals*. 2014:1321–1325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_221

13. Liu J-Y, Li Zh-Y, Tao Y-Q, Zhang D, Zhou K-Ch. Phase evolution of 17(Cu-10Ni)-(NiFe₂O₄-10NiO) cermet inert anode during aluminium electrolysis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(3):566–572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60752-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60752-8)

14. Lu J, Xia Z. The corrosion performance of a binary Cu-Ni alloy used as an anode for aluminum electrolysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;55–57:7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.55-57.7>

15. Glucina M, Hyland M. Laboratory scale testing of aluminium bronze as an inert anode for aluminium electrolysis. *Light Metals*. 2005:523–528.

16. Saranchuk VI, Oshovskij VV, Lavrenko AT, Koshkarev YaM. Method for determining the magnitude of the electrical resistance of coal depending on temperature. *Scientific Works of the Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and Chemical Technology*. Donetsk: Donetsk National Technical University; 2008. p. 138–143. (In Russ.)

17. Uleva GA. *Study of the physicochemical properties of special types of coke and its application for the smelting of high-silicon alloys* (Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences). Ekaterinburg; 2013. (In Russ.)

Сведения об авторах

Морозов Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-13 «Технологии обработки материалов», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0001-9229-7398, Scopus Author ID: 24475032700, eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426. E-mail: akafest@mail.ru

Ялунин Владимир Сергеевич, магистрант, кафедра «Металлургия», Московский политехнический университет (Московский Политех), Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. ORCID: 0000-0002-1994-7531. E-mail: molnir9@yandex.ru

About the authors

Yury A. Morozov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department MT-13 “Materials Processing Technologies,” Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9229-7398, Scopus Author ID: 24475032700, eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426. E-mail: akafest@mail.ru

Vladimir S. Yalunin, master’s student, Department “Metallurgy,” Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya St, Moscow, 111250, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1994-7531. E-mail: molnir9@yandex.ru