

УДК 669.713.72

Назначение и виды обжига при пуске алюминиевых электролизеров

© Д. В. Табаков, Н. В. Немчинова

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. Алюминий находит широкое применение в различных отраслях, в связи с этим производство данного металла занимает лидирующие позиции среди объёмов производства других цветных металлов. Срок службы электролизера является важным фактором, определяющим показатели производства единицы продукции. Особое внимание уделяется такой значимой особенности, влияющей на срок службы электролизера, как обжиг подины (катодного устройства) при пуске ванны после капитального ремонта. Целью обжига является создание монокристаллической подины, уменьшение и увеличение объёма угольных подовых блоков при проникновении натрия, являющегося основным компонентом криолитового электролита, при пуске, кроме того, целью является уменьшение термического удара при заливке электролита в нагретую подину. В работе проведён анализ видов обжига, используемых при пуске ванн на заводах по производству первичного алюминия. Показано, что одним из самых эффективных способов обжига является газопламенный обжиг, при котором производится нагрев подины пламенем и газо-воздушной смесью, образующимися при сжигании жидкого или газообразного топлива. Применение данного вида обжига позволяет достигать конечных температур подины перед пуском порядка 850–900 °С.

Ключевые слова: электролитическое получение алюминия, срок службы, обжиг катода, газопламенный обжиг

Purpose and Types of Roasting at the Aluminum Electrolyzers Start

© Dmitry V. Tabakov, Nina V. Nemchinova

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. Aluminum is widely used in various industries. In this regard, the production of this metal occupies a leading position among the production of other non-ferrous metals. The cell life is an important factor in determining unit production performance. In the article, special attention is paid to such a significant feature that affects the service life of the electrolyzer, such as the roasting of the hearth (cathode device) when starting the bath after a major overhaul. The purpose of roasting is to create a monolithic hearth, decrease and increase the volume of coal hearth blocks upon the penetration of sodium, which is the main component of cryolite electrolyte, during start-up, in addition, the purpose is to reduce thermal shock when electrolyte is poured into the heated hearth. The article analyzes the types of roasting used when starting up baths at factories for the production of primary aluminum. It has been proved that one of the most effective methods of roasting is gas-flame roasting, in which the hearth is heated by a flame and a gas-air mixture formed during the combustion of liquid or gaseous fuel. The use of this type of roasting allows reaching the final hearth temperatures before starting up of the order of 850–900 °C.

Keywords: electrolytic production of aluminum, service life, cathode firing, gas flame firing

Введение

Алюминий нашёл широкое применение в различных областях благодаря таким своим свойствам, как лёгкость, значительная электропроводность, высокая стойкость к коррозии. По объёмам производства алюминий занимает первое место среди других цветных металлов, уступает лишь стали и чугуну [1–3].

Алюминиевая промышленность нашей страны представляет собой динамично развивающуюся отрасль металлургии [4]. Круп-

нейшей компанией в России является «РУСАЛ». Предприятия и организации компании, а также научно-исследовательские и образовательные организации металлургического профиля производят алюминийсодержащую продукцию и предлагают решения вопросов по расширению сырьевой базы для производства Al_2O_3 [5–7], по улучшению основных эколого-технологических показателей основных производств [7–12].

Как известно, единственным промышленным способом получения алюминия является электролиз криолит-глиноземных расплавов¹ [1–3]. Металл получают на электролизерах, оснащённых предварительно обожжёнными анодами (ОА), являющимися экономически и экологически более выгодными по сравнению с более распространённым типом ванн на российских предприятиях – с самообжигающимися анодами (СА). Однако в настоящее время на российских предприятиях, производящих первичный алюминий, преобладают (~на 65 %) электролизеры с СА. Но уже наметился план переоснащения предприятий компании, направленный на повышение экологичности алюминиевого производства компании «РУСАЛ»².

Основные технико-экономические показатели производства первичного алюминия электролитическим способом зависят от многих факторов. К таким факторам относится срок службы электролизеров, то есть стабильная работа в течение 3,5–5 лет. Данный показатель, в свою очередь, зависит от многих параметров: конструкции катодного устройства, ведения технологического процесса, обжига и пуска ванн, используемых материалов при монтаже катодного устройства, а также от сборки всех элементов катодного устройства (рис. 1) [13].

Как видно из рисунка 1, от правильного проведения пусковой кампании электролизера (обжига и пуска) перед вводом в технологический процесс зависит длительность срока службы ванны.

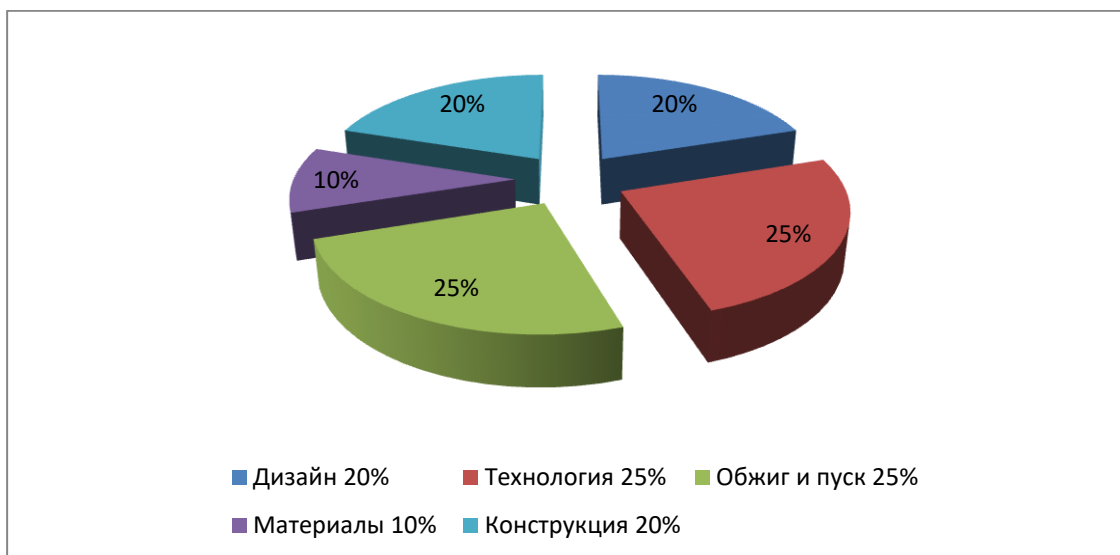


Рис. 1. Влияние различных факторов на срок службы электролизера

Назначение обжига подины электролизера

Катодное устройство электролизера с любым типом анода не имеет принципиальных отличий³. Поскольку угольные подовые блоки контактируют непосредственно с криолит-глиноземным расплавом, предъявляются высокие требования по их подготовке к началу работы.

После монтажа катодного устройства (укладки угольных подовых блоков и набойки межблочных швов подовой массой) на предприятиях проводят обжиг подины. Цель обжига – создать монолитную подину, уменьшить увеличение объёма подовых блоков при проникновении натрия из электролита (так называемое «натриевое расширение») при пуске, уменьшить термический удар при заливке электролита [14].

Вследствие неправильного или некачественного обжига может произойти нарушение целостности подины уже при обжиге или пуске по следующим причинам:

- возникновение трещин и расслоений в межблочных швах вследствие термических напряжений;
- отрыв межблочных швов от продольных и торцевых сторон подового блока и, как

¹ Гринберг И. С., Зельберг Б. И., Чалых В. И., Черных А. Е. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2009. 350 с.

² «Русал» выделит в отдельную структуру активы с более высоким углеродным следом // Интерфакс [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/business/767741> (11.11.2021).

³ Гринберг И. С., Зельберг Б. И., Чалых В. И., Черных А. Е. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2009. 350 с.

следствие, протёк расплава к блюмсам и в цоколь электролизера;

- отрыв периферийных швов от бортовой футеровки и торцевых сторон подового блока и, как следствие, протёк расплава к блюмсам и в цоколь электролизера;

- неравномерность натриевого расширения;

- неравномерность распределения тока в подине.

Между катодными угольными блоками укладывается подовая масса. Данные подовые массы состоят из твёрдых углеродистых материалов (наполнителей) и связующего. В качестве твёрдых углеродистых материалов используются антрацит и термоантрацит, искусственный графит. Связующее смачивает поверхность твёрдых частиц и связывает их между собой (применяют каменноугольный пек и добавки к нему, снижающие его температуру размягчения). Так, для пластичности массы в связующее добавляются лёгкие фракции каменноугольной смолы (антраценовые масла), которые действуют на пек как растворители и пластификаторы (термопластичные смолы).

При использовании пластифицированного связующего снижается температура набойки массы в швы, уменьшается выделение летучих при монтаже и обжиге.

Важнейшей задачей на этапе ввода электролизера в эксплуатацию является обеспечение целостности подины катодного устройства. В общем представлении непосредственно под «пуском» понимается заливка расплавленного электролита в ванну и подключение электролизера к току серии, после чего собственно начинается процесс электролиза. При пуске с формовкой нового анода подключение электролизера к току серии происходит на этапе формовки и обжига, в этом случае пуском считается заливка электролита и отрыв анода от подины. Правильное выполнение комплекса всех технологических операций, совокупность которых и определяется общим термином «пуск и пусковой период», имеет своей целью достичь выполнения следующих задач:

- в максимально возможный короткий срок привести ванну в рабочее технологическое состояние. В этот период должны стабилизироваться тепловые потоки в направлении бортов и днища катода, а также завершиться прогрев всех основных элементов футеровки. Конечной целью является достижение теплового равновесия ванны и начало формирования оптимальной формы

рабочего пространства (защитной настели и гарнисажа), способствующей длительной безаварийной эксплуатации электролизера с высокими технико-экономическими показателями;

- минимизировать риски возникновения локальных участков разрушения угольной футеровки катода, которые под воздействием расплава могут прогрессировать и со временем привести к тотальному разрушению подовой или бортовой поверхности ванны;

- заполнить образовавшиеся при обжиге, главным образом в набивных швах, микротрещины. Этому способствует точно рассчитанное количество, состав и порядок отдачи пускового сырья, а также химический состав и температура электролита, первично заливаемого при пуске с «ванн-маток» и фактически полученного в электролизере в пусковой период.

Признаками «нормальной» работы электролизера в пусковой период являются:

- незначительное количество или отсутствие глиноземсодержащего осадка на подине;

- электрические параметры, уровни металла и электролита соответствуют установленным регламентом значениям;

- стабильное снижение основных примесей в алюминии-сырце;

- отсутствие угольной «пены» в электролите;

- формирование к окончанию пускового периода прочной и равномерной корки электролита по всему периметру электролизера.

Технологический процесс ввода в эксплуатацию после капитального (локального) ремонта различается для электролизеров со старым анодом (газопламенный обжиг) и новым (обжиг с формовкой нового анода) и сводится к выполнению следующих основных операций: подготовка пускового электролита, выполнение предварительных операций, подготовка электролизера к пуску, пуск электролизера, эксплуатация электролизера в пусковой период.

Загрузка сырья в шахту пускового электролизера производится ровным слоем в область периферийных швов по всему периметру катода в количестве согласно утверждённым ежегодным нормам по типам электролизеров. Загрузка сырья осуществляется до начала монтажа установки газопламенного обжига (ГПО) электролизеров. В качестве сырья используется CaF_2 , при его отсутствии допускается применение сме-

шанного (регенерационного и флотационного) криолита или дроблёного оборотного электролита.

Виды обжига

Обжиг электролизера можно проводить двумя способами.

1. *Обжиг внутренними источниками тепла* производится джоулевой теплотой, выделяющейся при пропускании через подину постоянного электрического тока. Выделение тепла может происходить при разных вариантах проведения процесса: через слой металла с готовым анодом; с формированием нового СА на полной силе тока или при медленном увеличении силы тока; на коксовой мелочи; на алюминиевой стружке; на электролите без предварительного нагрева подины.

2. *Обжиг внешними источниками тепла* может осуществляться при использовании пламени, образующегося при сжигании жид-

кого или газообразного топлива; с помощью электрических нагревателей, размещаемых на подине и подключаемых в цепь серии.

Обжиг на металле со старым анодом (со старым катодом)

Данный вид обжига проводится для выведенных из эксплуатации электролизеров (остановленных на консервацию), а также при подготовке к повторному пуску без проведения капитального ремонта.

Шахта электролизеров прогревается горелками в течение 20–35 мин до температуры 100–110 °С. Анод поднимается на 20–40 мм от поверхности застывшего металла. Затем заливается жидкий алюминий в количестве 4–5 т, и анод погружается в металл на глубину не менее 20 мм. Разогрев электролизера производится в течение 2–3 суток (рис. 2) до достижения температуры металла не менее 850 °С.

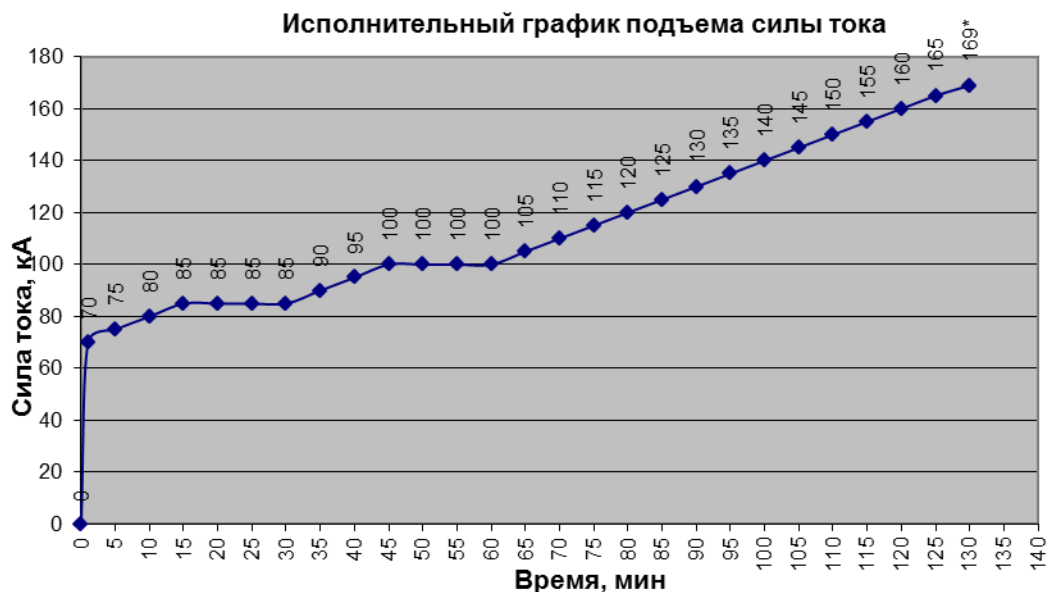


Рис. 2. График подъема силы тока при обжиге подины

В начальный период разогрева напряжение на электролизере должно быть 4,0–10,0 В. При установившемся напряжении более 10 В необходимо добавить жидкий алюминий. Через двое суток разогрева напряжение на ванне должно составлять 2,0–4,5 В.

Обжиг подины с формовкой нового анода

Применяется при пуске новых электролизеров, а также после капитального ремонта электролизеров при невозможности использования старого (самообжигающегося)

анода по технологическим причинам.

Контроль обжига производится по рабочему напряжению, изменению высоты конуса спекания анода в различных точках, токовой нагрузке на анодные штыри; состоянию поверхности коксопековой композиции.

Оптимальная продолжительность данного вида обжига составляет 96–120 ч. Обжиг считается законченным, когда минимальная высота конуса спекания в любой точке составляет не менее 500 мм. Столб анода должен быть не менее 1000 мм. Нормальным напряжением при обжиге является ве-

личина 3–5 В. Средняя величина нагрузки на штырь не должна превышать 5 кА.

Другие способы обжига подины

Обжиг подины на алюминиевой стружке

Обжиг аналогичен обжигу на коксовой мелочи. Ведётся до температуры ~600 °С, после достижения этой температуры производится дообжиг на расплавленном алюминии до достижения рабочего напряжения 3,0–4,5 В.

Обжиг подины электрическими нагревателями

На подину на кирпичные подставки устанавливаются нихромовые электронагреватели. Питание нагревателей осуществляется постоянным током 1,5 кА, отбираемым от шинпровода серии с напряжением 265 В. Длительность обжига составляет 24 ч, конечная температура поверхности подины достигает ~850 °С.

Обжиг подины на алюминиевых пластинах

Обжиг аналогичен обжигу на алюминиевой стружке. Ведётся до температуры ~600 °С, после достижения этой температуры осуществляется дообжиг на расплавленном алюминии. Продолжительность обжига на пластинах равна ~100 ч, последующий дообжиг на металле составляет ещё 20 ч.

Газопламенный обжиг подины

Нагрев подины производится пламенем и газо-воздушной смесью, образующимися при сжигании жидкого или газообразного топлива. Применение ГПО позволяет достигать конечных температур подины перед пуском порядка 850–900 °С.

До 1995 г. на Иркутском алюминиевом заводе (ИрАЗе) применялись пуски электролизеров после прогрева катода совмещённым способом, то есть предварительно нагревали подину электролизера двумя форсунками на жидком топливе. Форсунки устанавливались по диагонали, прогрев вёлся «умеренным факелом», через 10 мин положение форсунок менялось. Прогрев вёлся до 550 °С в течение 1,5–4,0 ч. Контроль за температурой обжига производился визуально.

В 1995 г. ИрАЗ начал переход на обжиг электролизеров после капитального ремонта при помощи газовых горелок (рис. 3). Установка для газового обжига электролизеров спроектирована АО «СИБИНСТРОМ» и изготовлена на ИрАЗе.

В 1996 и 1997 гг. на ИрАЗе проводился подбор режима обжига, отработки конструкции установки, начиная с 1998 г. все электролизеры после капитального ремонта стали обжигаться только при помощи газовых горелок.



Рис. 3. Установка для газового обжига подины

С октября 1999 г. внедрён график обжига подин электролизеров до температуры 900 °С продолжительностью 48 ч. Он предполагал равномерный подъём температуры в течение первых 10 ч до 300 °С, затем в течение 30 ч – со скоростью 20 °С/ч и выдержку в течение последующих 8 ч при температуре 900 °С. ГПО подин пусковых электроли-

зеров осуществлялся на ИрАЗе с использованием 16 горелок (по 8 с каждой продольной стороны). На рис. 4 приведена общая схема проведения обжига (поперечный разрез электролизера).

Также на предприятии были проведены испытания по 72-часовому обжигу подины (рис. 5).

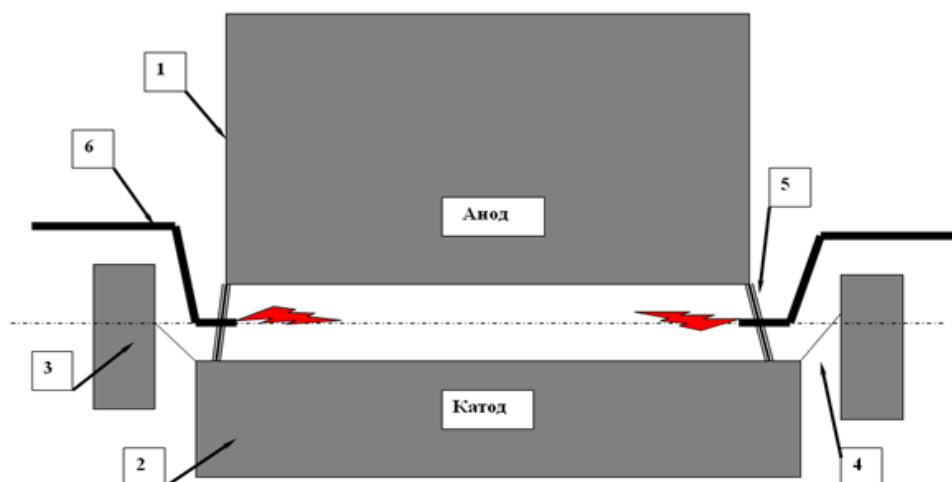


Рис. 4. Положение форсунок горелок между анодом – катодом при газопламенном обжиге: 1 – анод; 2 – катод; 3 – боковой блок; 4 – периферийный шов; 5 – укрытие; 6 – горелка

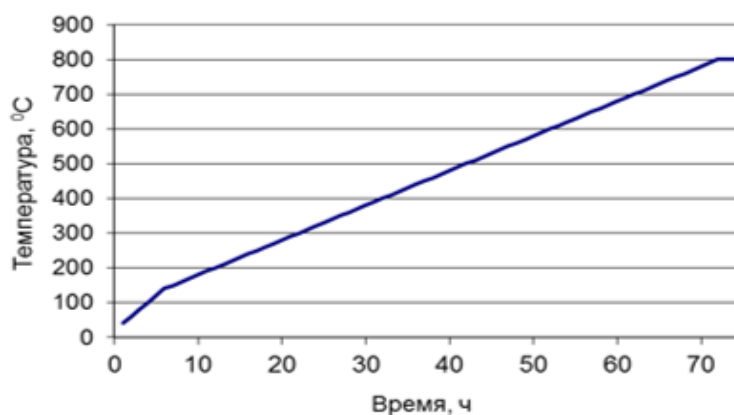


Рис. 5. График подъема температуры обжига подины электролизера

Основные результаты испытания 72-часового графика ГПО угольной подины заключаются в следующем.

1. Реальная температура подины на любом этапе процесса всегда ниже регистрируемой и заданной. Средняя температура поверхности подины под проекцией анода на оси электролизера (замер проводился датчиком температуры фирмы Thermopoint) в конце обжига составила 720–730 °C, в то время как конечная требуемая температура равна 800 °C.

2. Вдоль продольной оси катода имеется значительный перепад (градиент) температур даже под подовыми блоками, при регулировке температуры обжига этот градиент зачастую превышает 300 °C.

3. Достигнутые в конце обжига по 72-часовому графику подъема значения температур несколько выше, чем при 48-часовом графике. Достигнутое увеличение не превышает 20 °C, что объясняется одинаковой конечной заданной величиной температуры подин. Рост температуры на дне перифе-

рийного шва после пуска электролизера проходил со следующей скоростью: для 48-часового графика – 26–30 °C/ч, для 72-часового – 11–6 °C/ч. При значительно меньшей скорости роста температуры в подовой массе швов резко уменьшается вероятность образования в них дефектов, связанных с процессами коксования материала.

4. Пуск электролизеров (ввод в технологический процесс электролиза) после 72-часового обжига проходил более мягко и спокойно (меньшие амплитуда и длительность вспышки).

С 2009 г. ИркАЗ перешёл на обжиг топливной системой обжига «Hotwork». При проведении обжига электролизеров установкой «Hotwork» нагрев катода производится пламенем и горячим газом, полученными в результате сжигания дизельного топлива в горелочных устройствах, поступающего под укрытие через сопла форсунок. На ваннах с СА принят 48-часовой график обжига, для ванн с ОА – 72-часовой.

Список источников

1. Grjotheim K., Welch B. J. Aluminium Smelter Technology. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1988. 327 p.
2. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
3. Prasad S. Studies on the Hall-Heroult Aluminium Electrowinning Process // Journal of the Brazilian Chemical Society. 2000. Vol. 11. № 3. P. 245–251. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000300008>.
4. Сизяков В. М., Власов А. А., Бажин В. Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>.
5. Dubovikov O. A., Brichkin V. N., Ris A. D., Sundurov A. V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // Non-ferrous Metals. 2018. № 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.
6. Бричкин В. Н., Куртенков Р. В., Элдиб А. Б., Бормотов И. С. Состояние и пути развития сырьевой базы алюминия небокситных регионов // Обогащение руд. 2019. № 4. С. 31–37. <https://doi.org/10.17580/or.2019.04.06>.
7. Шепелев И. И., Головных Н. В., Сахачев А. Ю., Жижаев А. М., Котлягин А. Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // Вестник ИРГТУ. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>.
8. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 // Light Metals. 2015. P. 757–762. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch128>.
9. Немчинова Н. В., Тютрин А. А., Бараускас А. А. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // Цветные металлы. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>.
10. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter // Light Metals. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>.
11. Nemchinova N. V., Belskii S. S., Vlasov A. A. Studying Aluminum Alloy Defects // Solid State Phenomena. Vol. 316. P. 353–358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.353>.
12. Тютрин А. А., Немчинова Н. В., Володькина А. А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // Вестник ИРГТУ. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>.
13. Сорлье М., Ойя Х. Катоды алюминиевого электролизера. Красноярск: Версо, 2013. 669 с.
14. Данекин А. В., Немчинова Н. В. Пуск электролизера с обожжёнными анодами после капитального ремонта // Молодежный вестник ИРГТУ. 2021. Т. 11. № 2. С. 23–28. [Электронный ресурс]. URL: <http://мвестник.рф/journals/2021/02/articles/04> (02.06.2021).

Сведения об авторах / Information about the Authors

Табакон Дмитрий Викторович,
магистрант,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: dtabakov@mail.ru

Немчинова Нина Владимировна,
доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой металлур-
гии цветных металлов,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: ninavn@yandex.ru

Dmitry V. Tabakov,
Postgraduate,
High Technologies Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: dtabakov@mail.ru

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Technics),
Professor, Head of the Non-Ferrous Metals Met-
allurgy Department,
High Technologies Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: ninavn@yandex.ru