

Д. т. н. В. Ю. Бажин (✉), к. г.-м. н. А. В. Саитов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»,
Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.762.8:621.357.1

УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕГРАФИТОВОЙ ФУТЕРОВКИ С ЛИТИЕВЫМИ ДОБАВКАМИ

Обсуждена проблема повышения стойкости углеграфитовой подовой футеровки для защиты от диффузии натрия и криолит-глиноземного расплава (КГР). Аналитическая оценка показала, что основной защитой от различного рода воздействия электролита на углеграфитовую футеровку применяют различные покрытия, которые не нашли широкого промышленного применения ввиду их выхода из строя. Показано положительное влияние добавок лития в КГР на свойства углеграфитовой подовой футеровки. Установлено активное влияние лития на изменение физических и эксплуатационных свойств футеровки в результате процесса интеркаляции. Улучшение свойств углеграфитовой футеровки электролизера подтверждено серией экспериментальных работ, проведенных с литиевыми электролитами.

Ключевые слова: углеграфитовая футеровка, алюминиевый электролизер, электролиз, интеркаляция лития, электролит, катодное устройство.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в рамках развития ресурсо- и энергосберегающих технологий остаются актуальными задачи, направленные на улучшение физических и эксплуатационных характеристик катодной футеровки, в частности для защиты от диффузии натрия с применением различных покрытий. Для повышения электропроводности подины электролизера сохраняется устойчивая тенденция к использованию графитированных углеродных материалов [1, 2]. Имеются решения [3, 4], направленные на улучшение характеристик углеграфитовой футеровки и защиты от проникновения электролита при применении различных покрытий, смачивающихся расплавом алюминия, на основе высокотемпературных добавок диборида титана и оксида алюминия. Существуют разработки безуглеродных инертных катодных материалов [5, 6], применение которых позволяет существенно снизить затраты и повысить срок службы футеровки. В качестве покрытий применяют тугоплавкие соединения или инертные материалы [7, 8], из которых наиболее подходящими являются покрытия на основе TiB_2 , ZrB_2 , BN , TiC , SiC , суспензия из смеси TiB_2 и глинозема, TiB_2-C , TiB_2-WSi_2 ; именно они привлекают большое внимание производителей алюминия.

В последнее время смачиваемые алюминием углеграфитовые подины с покрытиями из диборида титана испытывают в электролизерах ОА американской фирмы Alcoa [9, 10].

Технология смачиваемого алюминием катода позволяет проводить электролиз алюминия при низком уровне металла в ванне (15–20 мм) с сокращением межполюсного зазора (МПЗ), что обеспечивает снижение влияния электромагнитных сил и стабильную геометрию катодной поверхности; при этом увеличивается срок службы электролизеров [9, 10]. Кроме того, конструкция смачиваемого катода позволяет минимизировать падение напряжения, которое может достигать 50–60 мВ, так как по классической технологии между угольной подиной и жидким алюминием находится тонкий слой электролита, из-за которого энергопотребление при производстве алюминия снижается на примерно 400 кВт/ч на 1 т Al [11–14].

К недостаткам предлагаемых и разработанных композитных материалов относят растворимость и сложность их интегрирования в конструкцию катода. Например, скорость растворения TiB_2 оценивается в пределах 0,25–1,25 мм в год в зависимости от условий изготовления композита и нанесения его на катод, а также от параметров электролиза [10, 15]. Передовыми компаниями, проводящими исследования в области применения смачиваемых катодов, являются Chalco, Rio Tinto Alcan, Molteck и Comalco. Низкий срок службы керамических композиционных покрытий, их высокая стоимость, загрязнение металла из-за растворения в электроли-



В. Ю. Бажин
E-mail: bazhin-alfoi@mail.ru

те после отслоения замедляют промышленное внедрение этого технического решения на предприятиях производства алюминия.

Другим инновационным решением в разработке катодов алюминиевого электролизера является использование рельефной подины по технологии Novel structure of cathode (NSC) компании Chalco (рис. 1) [16–19]. Практические результаты, полученные на опытных электролизерах компании Chalco, показали, что профильная поверхность катода действует как барьер волнового движения слоя металла при изменении МГД-ситуации и позволяет в несколько раз снизить влияние МГД-сил, флуктуацию расплава и значительно уменьшить МПР, а следовательно, и расход электроэнергии [20, 21]. Кроме того, у такой конструкции катода снижается рабочая область, которая приводит к потере алюминия при его растворении, связанной с его диспергированием и взаимодействием с частицами углерода, содержащимися в электролите. Единственный недостаток использования такой технологии — необходимость применения дорогих систем для контроля технологических параметров и теплового баланса, а также систем автоматизированного питания глиноземом и фтористыми солями для устранения образования осадков глинозема на подине электролизера.

Возобновляются исследования [22, 23], доказывающие значительное улучшение физических свойств и эксплуатационных характеристик катодных блоков за счет интеркаляции лития. Еще в 1955 г. в трудах ВАМИ



Рис. 1. Рельефная подина по технологии Novel structure of cathode (NSC) компании Chalco

«Повышение стойкости катодных блоков алюминиевых электролизеров» профессор Горного университета М. Б. Рапопорт [24] подробно исследовал процесс интеркаляции щелочных металлов и сделал вывод: атомы лития могут беспрепятственно внедряться в межслоевые структурные пространства кристаллической решетки углеграфитовых материалов с образованием ламеллярных соединений Li_xC_y . Однако этот вывод имел лишь теоретическую концепцию и не получил дальнейшего развития. Первые практические результаты были получены на Уральском алюминиевом заводе в 1992–1994 гг., когда во время массового введения литиевых добавок в электролит отмечался рост срока службы электролизеров (до 5000 сут). Особое внимание привлекало упрочнение катодных блоков, которое было зафиксировано во время выбивки подины после отключения электролизеров.

В 1986 г. была опубликована статья [25], в которой обсуждены зоны и микропоры, подвергшиеся интеркаляции в угольных блоках, в составе которых преобладал литий, а не натрий, и сделаны выводы, что скорость проникновения натрия в не пропитанный литием катод на несколько порядков выше, чем у пропитанного литием катодного материала.

В статье [26] обсуждена проблема расширения линейных размеров катода при внедрении натрия. Авторы статьи исследовали добавку соли лития LiF и установили, что введение LiF приводит к снижению расширения катода и, в свою очередь, увеличивает срок службы электролизера. Следует отметить, что эти исследования не были использованы для решения технологической задачи повышения срока службы подовой углеграфитовой футеровки алюминиевого электролизера. Поэтому представляют научно-практический интерес исследования с литием для разработки рациональных технических решений по модифицированию углеграфитовой подовой футеровки алюминиевого электролизера для создания барьерного антидиффузионного слоя, препятствующего проникновению натрия и КГР вглубь катодного устройства, а также разрушению подовой футеровки в поверхностных слоях.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЛИТИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА СВОЙСТВА УГЛЕГРАФИТОВОЙ ФУТЕРОВКИ

Литий имеет самый маленький ионный радиус из всех щелочных металлов, который способен поместиться (встроиться) между структурными слоями графита, изгибая, скручивая и деформируя их, так же как и в дефектных полостях внутри слоев, без разбухания и деградации. Следовательно, литий способен адсорбировать-

ся как на графитовых, так и в аморфных угольных материалах (относительное межплоскостное расстояние от $3,34 \cdot 10^{-10}$ до $3,44 \cdot 10^{-10}$ м) без суммы деформации напряжений, способной разрушить углеродный материал. Соединение в виде интеркалята LiC_6 является основным состоянием для литий-графитовых соединений, но некоторые другие аморфные формы углерода способны упаковывать Li внутрь кристаллической решетки в соединение, близкое к Li_2C_2 , или согласно [27] в Li_6C_{32} .

В Горном университете на базе кафедры металлургии проведены исследования с восстановлением атомов лития из расплава Li_2CO_3 на углеграфитовом катоде и получением интеркаляционных соединений лития Li_xC_y . Катодом являлся образец стандартного углеграфитового катодного блока ГК «Энергопром». Для проведения опытов использовали установку в виде электролитической ячейки (рис. 2). Во время проведения экспериментов обнаружено, что при нагревании Li_2CO_3 до 750°C происходит образование оксида лития по реакции



Во время электролиза расплава Li_2O , а именно при включении источника постоянного тока, в расплаве наблюдаются вспышки розового цвета. Это явление объясняется эффектом ионизации (анодным эффектом электролиза), когда пары металлического лития [28, 29] под воздействием постоянного тока переходят в ионную форму и под давлением паров внедряются в поверхностные слои графита (рис. 3).

Проведенное исследование показало [30], что литий первоначально проникает в более пористые зоны материала, поэтому более вероятным представляется диффузионный механизм его внедрения в слой углеграфитового образца согласно закону Фика. Глубину проникновения лития можно оценить при разрезании цилиндрического образца после эксперимента и последующего электронно-микроскопического исследования. На отсканированных участках электронного изображения видны (рис. 4) контуры фазы графита с внедренным литием.

Результаты рентгенофазового анализа образцов после выдержки в течение 12 ч показали, что литий имеет достаточно глубокое внедрение (0,5–1,0 мм); при этом его атомы не транспортируются по границам зерен. По всей вероятности, это элементарный литий, поскольку эмиссия в рентгеновских лучах не увеличилась по сравнению с исходным материалом. С другой стороны, определенное в рентгеновских лучах проникновение лития наблюдается во всех зонах материала, но ее значительное увеличение обнаружено именно в пористой структуре.

Установлено, что при взаимодействии паров лития происходят последовательное внедрение

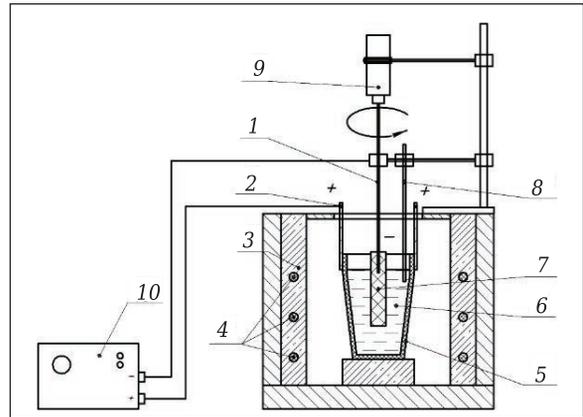


Рис. 2. Лабораторная электролитическая ячейка: 1 — токоотвод в виде стального стержня; 2 — токоподвод; 3 — шахтная печь; 4 — нагревательные элементы; 5 — графитовый тигель; 6 — электролит; 7 — углеграфитовый образец; 8 — терморпара ХА; 9 — электрическая мешалка; 10 — источник постоянного тока на 10 А

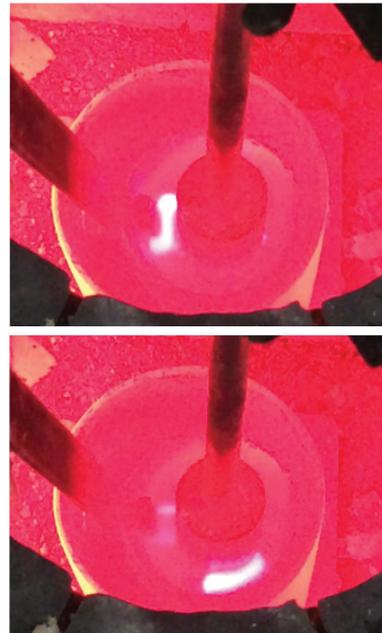


Рис. 3. Эффект ионизации — анодный эффект электролиза

лития и образование интеркалятов LiC_6 , LiC_{12} и LiC_{18} на межфазной границе с проникновением лития в микropоры. По-видимому, адсорбция лития между слоями и в его объеме связана с дефектами кристаллической структуры графита, которые и служат главным источником накопления лития, вследствие чего и меняется стехиометрия.

Исследования показали, что несмотря на то, что проникновение лития проходит по всей кристаллической решетке, его миграция ограничена более пористой матрицей связующего компонента. При воздействии паров внедрение лития в поверхностные слои углеграфитового материала происходит в несколько этапов: 1-й этап — адсорбция лития на поверхности, в порах

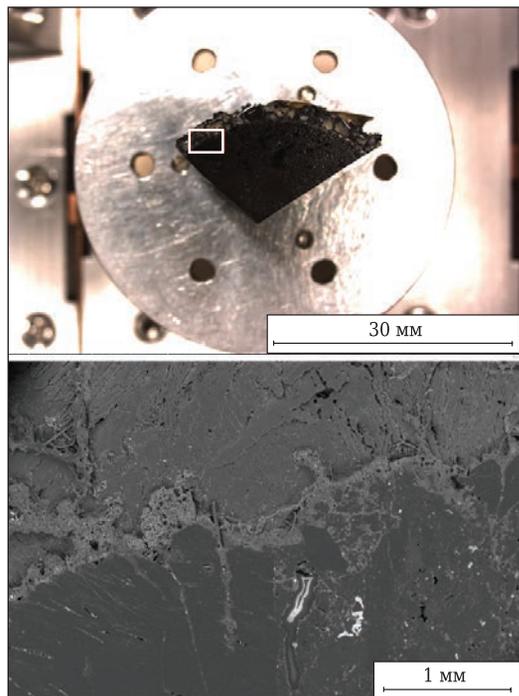


Рис. 4. Контуры фазы графита с внедренным литием

и трещинах; 2-й этап — первичное внедрение лития в поверхностный слой с проскакиванием отдельных атомов за счет избыточного давления; 3-й этап — распределение атомов в объеме поверхностного слоя; 4-й этап — процесс интеркаляции лития с углеродом и срастание слоев. Расчетами определено, что энергия активации образования фазы Li_xC_y составляет 12,4–15,7 кДж/моль. Начальная концентрация литиевых дефектов в диапазоне 1300–1500 °С составляет 0,005–0,014 моль/см³, коэффициент диффузии (9,76±0,5) см²/с.

Кроме того, исследования, проведенные после непосредственного контакта электролита с углеродистым материалом, показали, что при его электролитическом взаимодействии с литием происходит вспучивание материала по границам зерен графита и образуются небольшие разрывы из-за переизбытка по всей активной

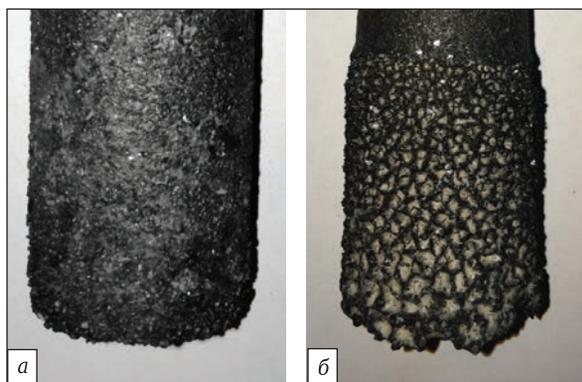


Рис. 5. Состояние поверхности углеродистого катода: а — до электролиза; б — после электролиза

площади (рис. 5). Эффект от внедрения лития можно объяснить частичным вхождением оксида лития в микропоры углеродистого материала, а внедренные ионы лития создают эффект локальных раковин на поверхности. При этом поверхность в той части исследуемого образца, которая находилась над расплавом во время электролиза при 960 °С, не была подвержена окислению в отличие от стандартного образца. Вероятно, что при возгонке лития из расплава он взаимодействует с кислородом, предотвращая разрушение поверхности исследуемого углеродистого материала.

Внедрение лития в поверхностные слои футеровки при его электролитическом восстановлении на поверхности образца происходит в несколько этапов: этап I — образование оксида лития по реакции (1) при нагревании электролита с добавкой Li_2CO_3 до 750 °С; этап II — образование ионов лития при 960 °С под воздействием тока через электролит $Li_2CO_3-Li_2O$; этап III — внедрение в графитированные слои углеродистого материала при нарастающем воздействии и повышении давления паров во время эффекта ионизации атомов лития; этап IV — внедрение лития в глубину слоистых структур с последующим образованием интеркалятов различного состава с увеличением длительности выдержки образцов в электролите при усилении эффекта ионизации.

Результаты рентгеноструктурных исследований показали, что в прореагировавшей части содержится Li_2CO_3 , что обусловлено неполным протеканием реакции разложения и перехода Li_2CO_3 в оксид лития Li_2O с последующим высвобождением свободного лития в виде металла и ионов. Несмотря на это, как и натрий согласно данным [31], литий ниже 1000 °С может существовать как беспорядочный твердый раствор, в котором он может двигаться, а не как определенное соединение или ряд соединений (рис. 6). Подвижность лития проявляется коэффициентом диффузии порядка 10^{-5} см²/с. Этот порядок величины характерен для жидкости и для таких твердых соединений при высокой температуре, как Ag_2S , в котором большие анионы S^{2-} формируют жесткую упорядоченную решетку, а меньшие катионы Ag^+ беспорядочны и свободно мигрируют, как в расплаве. Таким образом, эффект ионизации лития при прохождении тока под воздействием давления избыточных паров создает условия для внедрения в слоистые структуры графита ионов лития. В отличие от известных методов внедрения лития при получении литий-ионных аккумуляторов данный эффект является альтернативным для высокотемпературных процессов в химически активной среде расплавов. В результате выдержки образцов, вырезанных из стандартного углеродистого блока, в литиевом электролите получены более

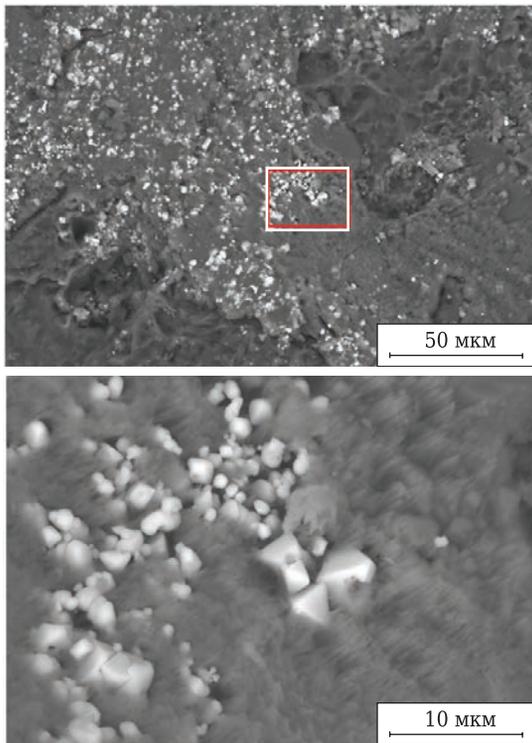


Рис. 6. Фотография поверхности образца

высокие характеристики углеграфитового материала (см. таблицу).

В результате внедрения лития в поверхностные слои образцов повышается теплопроводность и снижается пористость, что исключает проникновение натрия в процессе электролиза. При этом повышается электропроводность, что может снизить перепад напряжения в подовом блоке на 10–15 % и улучшить энергетические характеристики катодного устройства в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для защиты от различного рода воздействия электролита на углеграфитовую футеровку применяют различные покрытия, в составе которых преобладают дибориды титана, бориды, оксиды алюминия. Но, как показала практика, такие

Библиографический список

1. **Сизяков, В. М.** Особенности разрушения подины высокоамперного электролизера / В. М. Сизяков, В. Ю. Бажин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2013. — № 5. — С. 5–8.
2. **Сизяков, В. М.** Features of high-ampere electrolyzer hearth breakdown / V. M. Sizyakov, V. Yu. Bazhin, R. K. Patrino [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 151–154.
3. **Саитов, А. В.** Проблемы эксплуатации футеровки современных алюминиевых электролизеров из графитированных катодных блоков / А. В. Саитов, В. Ю. Бажин, Р. Ю. Фещенко // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 88–91.
4. **Saitov, A. V.** Operational problems of a graphitized cathodic block lining in contemporary aluminum

Сравнительные характеристики углеграфитового материала

Образец	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Пористость, %
Исходный	33–35	7–9	13–14
Выдержанный в литиевом электролите	19–20	21–23	9–11

покрытия не нашли широко промышленного применения ввиду их дороговизны и быстрого выхода из строя. Ведутся работы по созданию инертных материалов катода, созданы опытные образцы, но их дальнейшее развитие остановлено из-за сложности внедрения и дороговизны. В Горном университете проводятся исследования, доказывающие значительное улучшение физических параметров и эксплуатационных характеристик катодных блоков за счет интеркаляции лития.

Представленные результаты исследований углеграфитового материала после взаимодействия с литием и его соединениями доказывают, что существует сопутствующее электролизу высокотемпературное взаимодействие компонентов системы в расплаве, которое сопровождается как разрушением рабочей поверхности углеграфитового материала, так и упрочнением поверхности, которая не подвергается разрушению. В результате взаимодействия углеграфитового материала с литиевыми добавками достигается значительное улучшение физических свойств и эксплуатационных характеристик катодных блоков за счет интеркаляции лития в поверхностные слои.

Полученный эффект от внедрения лития при теоретическом обосновании и технологической проработке можно рассматривать в качестве наиболее предпочтительного решения повышения эффективности работы углеграфитовых катодных блоков, основанного на создании барьерного антидиффузионного слоя за счет внедрения атомов лития с образованием интеркалированных соединений на поверхности.

5. **Saitov, A. V., Bazhin, V. Yu., Feshchenko, R. Yu.** Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 126–129.

6. **Горланов, Е. С.** Карбидообразование на смачиваемой алюминием катодной поверхности углеграфитовой футеровки / Е. С. Горланов, В. Ю. Бажин, С. Н. Федоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 23–27.

7. **Gorlanov, E. S.** Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum / E. S. Gorlanov, V. Yu. Bazhin, S. N. Fedorov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 292–296.

8. **Bao, S.** Wetting of pure aluminium on graphite, SiC and Al₂O₃ in aluminium filtration / S. Bao, K. Tang, A.

Kvithyld [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. — 2012. — Vol. 22, № 8. — P. 1930–1938.

5. **De Nora, V.** Inert anode: challenges from fundamental research to industrial application / *V. De Nora, T. Nguyen* // Light Metals. — 2009. — P. 417–421.

6. **Han-bing, HE.** Corrosion of NiFe₂O₄-10NiO-based cermet inert anodes for aluminium electrolysis / *HE Han-bing, Wang Y., Long Jia-ju, Chen Zhao-hui* // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. — 2013. — Vol. 23, № 12. December. — P. 3816–3821.

7. **Haupin, W.** Cathodes wetted by aluminum improve current efficiency / *W. Haupin* // Light Metals. — 1999. — P. 395–398.

8. **Pawlek, R. P.** Wetable cathodes: an update / *R. P. Pawlek* // Light Metals. — 2010. — P. 377–402.

9. **Ren, B.** Application of TiB₂ coating cathode blocks made by vibration moulding for 300 kA aluminium reduction cells / *B. Ren* // Light Metals. — 2007. — P. 1047–1050.

10. **Qing-yu, Li.** Using TiB₂ system dynamic modelling for scenario simulations in aluminium electrolysis plants / *Li Qing-yu, Lai Yan-qing, Liu Yong-gang* [et al.] // Light Metals. — 2004. — P. 327–332.

11. **Kvande, H.** Energy balance / *H. Kvande* // Conference materials. Fundamentals of Aluminium Production. — 2004. — P. 197–216.

12. **Grjotheim, K.** Aluminium smelter technology / *K. Grjotheim, B. Welch*. — Düsseldorf : Aluminium Verlag, 1988. — 327 p.

13. **Минцис, М. Я.** Электрометаллургия алюминия / *М. Я. Минцис, П. В. Поляков, Г. А. Сиразутдинов*. — Новосибирск : Наука, 2001. — 368 с.

14. **Галевский, Г. В.** Metallurgy of aluminium. Technology, electrosupply, automation : a textbook for universities / *Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов*. — М. : Наука, 2008. — 529 с.

15. **Ibrahiem, M. O.** Stability of TiB₂-C composite coatings / *M. O. Ibrahiem, T. Foosnes, H. A. Oye* // Light Metals. — 2006. — P. 691–696.

16. **Naixiang, F.** New cathodes in aluminum reduction cells / *F. Naixiang, T. Yingfu, P. Jianping* // Light Metals. — 2010. — P. 405–410.

17. **Shaofeng, F.** Technology study in 200 kA pots using novel cathodes with Ridges / *F. Shaofeng* // Journal of Materials and Metallurgy. — 2010. — Vol. 9. — P. 23–29.

18. **Jianping, Peng.** Development and application of an energy saving technology for aluminum reduction cells / *Peng Jianping, Feng Naixiang, Feng Shaofeng, Liu Jun* // Light Metals. — 2011. — P. 1023–1027.

19. **Naixiang, Feng.** Application of energy saving technology for aluminium reduction with novel structure cathodes / *Feng Naixiang, Peng Jianping, Wang Yaowu* [et al.] // Aluminium of Siberia. — 2013. — P. 536–539.

20. **Бажин, В. Ю.** Концепция работы алюминиевого электролизера без анодного эффекта / *В. Ю. Бажин, Д. В. Макушин, А. В. Саитов* // Записки горного института. — 2013. — Т. 202. — С. 147–150.

21. **Бажин, В. Ю.** Влияние МГД-стабильности мощного алюминиевого электролизера на выход по току / *В. Ю. Бажин, Д. В. Макушин* // Записки горного института. — 2011. — Т. 192. — С. 35–38.

22. **Sorlie, M.** Cathodes in aluminium electrolysis / *M. Sorlie, H. Oye*. — Düsseldorf : Aluminium Verlag, 2013. — 643 p.

23. **Рапопорт, М. Б.** Углеродистые межслойные соединения и их значение в металлургии алюминия / *М. Б. Рапопорт*. — М. : ЦНИИ цветметинформация, 1967. — 67 с.

24. **Рапопорт, М. Б.** Повышение стойкости катодных блоков алюминиевых электролизеров / *М. Б. Рапопорт* // Труды ВАМИ. — 1955. — Т. 38.

25. **Newman, D. S.** The effect of Li on graphitic cathodes used in aluminum electrolysis / *D. S. Newman, H. Justnes, H. A. Oye* // Metall. — 1986. — Vol. 6. — P. 582–584.

26. **Naas, T.** Interactions of alkali metal with cathode carbon / *T. Naas, H. A. Oye* // The Minerals, Metals & Materials Society (TMS); Aluminum Committee in LIGHT METALS. — WARRENDALE. — P. 193–198.

27. **Ubbelohde, A. R.** Graphite and its crystal compounds / *A. R. Ubbelohde, F. A. Lewis*. — Oxford University Press, 1965. — 249 p.

28. **Ермолаева, Т. Н.** Качественный анализ: методические указания к лабораторным работам по аналитической химии / *Т. Н. Ермолаева*. — Липецк : ЛГТУ, 2004. — 37 с.

29. **Калюкова, Е. Н.** Свойства металлов и их соединений : уч. пособие / *Е. Н. Калюкова*. — Ульяновск : УлГТУ, 2009. — 156 с.

30. **Бажин, В. Ю.** Защита углеродистой футеровки алюминиевого электролизера интеркаляционным слоем лития / *В. Ю. Бажин, Р. Ю. Фещенко, А. В. Саитов, Е. А. Кузнецова* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 3. — С. 87–91.

Vazhin, V. Yu. Protection of an aluminum electrolyzer carbon-graphite lining by a lithium intercalation layer / *V. Yu. Vazhin, R. Yu. Feshchenko, A. V. Saitov, E. A. Kuznetsova* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 81–83.

31. **Dewing, E. W.** The reaction of sodium with nongraphitic carbon reactions occurring in the linings of aluminium reduction cells / *E. W. Dewing* // Trans. of Met. Soc. of AIME. — 1963. — Vol. 227. December. — P. 1328–1334. ■

Получено 22.10.17

© В. Ю. Бажин, А. В. Саитов, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

2-я Глобальная конференция и выставка Cemprocess
Оптимизация в цементной промышленности

global PROCESS OPTIMISATION
IN CEMENT MANUFACTURE
cemprocess
 CONFERENCE & EXHIBITION

23–24 мая 2018 г. Лондон, Великобритания

www.globalcement.com