

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ TiB_2 ДЛЯ РЕМОНТА ЛОКАЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПОДОВЫХ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

© 2019 г. Г.Е. Нагибин, А.В. Завадяк, И.И. Пузанов, А.В. Прошкин, Е.Н. Федорова,
С.С. Добросмыслов, И.А. Кириллова, Н.В. Суходоева

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

ООО «Объединенная компания «РУСАЛ Инженерно-технологический центр» (ООО «РУСАЛ ИТЦ»),
г. Красноярск

Институт вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН), Красноярский филиал
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН),
г. Красноярск

Статья поступила в редакцию 25.09.18 г., доработана 25.12.18 г., подписана в печать 28.12.18 г.

Разработаны состав и технология получения ремонтной смеси, состоящей из неформованного корунда с композиционным, смачиваемым алюминием покрытием $\text{TiB}_2\text{—C}$, для ремонта локальных разрушений подовых блоков без остановки электролизера. Предложенное техническое решение позволило уменьшить износ подины и повысить срок службы алюминиевого электролизера на 6 мес. Для получения ремонтной смеси оптимального состава использовали порошок диборида титана с огнеупорным порошкообразным связующим в соотношении 50 : 50 (мас.%). Полученной смесью связующего и диборида титана покрывали неформованный корунд. Далее материал сушили при температуре 150 °С и подвергали термообработке в углеродной засыпке при $t = 700\div 900$ °С. В результате обжига в восстановительной среде на поверхности неформованного корунда формируется композиционный материал $\text{TiB}_2\text{—C}$ с содержанием углерода 15–20 мас.%. Качественная оценка свойств разработанного композиционного покрытия показывает, что после обжига оно имеет достаточно высокую твердость, износостойкость, адгезию к основе. Для проведения опытно-промышленных испытаний ремонтную смесь заливали расплавленным алюминием, в результате чего была получена ремонтная масса состава $\text{Al—TiB}_2\text{—C}$ в виде плит. Проведенные опытно-промышленные испытания ремонтной массы на действующем электролизере РА-400 в опытном цехе ОАО «РУСАЛ-Саяногорск» показали, что через 3 мес. после ремонта локальных разрушений без остановки электролизной ванны удалось замедлить износ подины. Об этом факте свидетельствует уменьшение среднего значения глубины повреждения на 13 % при стабильном значении силы тока 4,7–4,8 кА/блэмс после ремонта. Таким образом, локальное использование ремонтной массы замедлило общий износ катодной поверхности и позволило продлить срок службы электролизера.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, подовый блок, локальный ремонт, диборид титана, композиционное покрытие, износ.

Нагибин Г.Е. — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости» Инженерно-строительного института СФУ (660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 20). E-mail: NagibinI@gmail.com.

Завадяк А.В. — зам. директора по созданию высокоамперных технологий, инженерно-технологическая дирекция алюминиевого производства ООО «РУСАЛ ИТЦ» (660067, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37). E-mail: Andrey.Zavadyak@rusal.com.

Пузанов И.И. — менеджер, инженерно-технологическая дирекция алюминиевого производства ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: Iliya.Puzanov@rusal.com.

Прошкин А.В. — докт. техн. наук, нач.-к лаборатории углеродных и футеровочных материалов, инженерно-технологическая дирекция алюминиевого производства ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: Aleksandr.Proshkin@rusal.com.

Федорова Е.Н. — канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной механики Политехнического института СФУ (660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 20), ст. науч. сотр. ИВТ СО РАН, Красноярский филиал (660049, г. Красноярск, пр. Мира, 53). E-mail: Fefedorova@sfu-kras.ru.

Добросмыслов С.С. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости» Инженерно-строительного института СФУ, науч. сотр. ФИЦ КНЦ СО РАН (660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50). E-mail: Dobrosmislov.s.s@gmail.com.

Кириллова И.А. — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Композиционные материалы и физико-химия металлургических процессов» Института цветных металлов и материаловедения СФУ (660122, г. Красноярск, ул. Академика Павлова, 77-2). E-mail: Iakirillova17@gmail.com.

Суходоева Н.В. — инженер кафедры прикладной механики Политехнического института СФУ. E-mail: Suhodoevanadezda@gmail.com.

Для цитирования: Нагибин Г.Е., Завадяк А.В., Пузанов И.И., Прошкин А.В., Федорова Е.Н., Добросмыслов С.С., Кириллова И.А., Суходоева Н.В. Разработка и промышленные испытания композиционного материала на основе TiB_2 для ремонта локальных разрушений подовых блоков электролизера. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 3. С. 12–19. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-12-19.

Nagibin G.E., Zavadyak A.V., Puzanov I.I., Proshkin A.V., Fedorova E.N., Dobrosmyslov S.S., Kirillova I.A., Sukhodoeva N.V.

Development and industrial tests of composite material based on TiB_2 for repair of local destructions in electrolyzer bottom blocks

The paper presents the developed composition and technology for obtaining a repair mixture consisting of lumped corundum with a TiB_2 –C composite coating wettable with aluminum for restoration of local bottom block fractures without electrolyzer stops. The proposed technical solution made it possible to reduce bottom wear and increase aluminum electrolyzer service life by 6 months. A mixture of titanium diboride powder and a refractory powder-like binder in a ratio of 50 : 50 (wt.%) was used to obtain the repair mixture with an optimal composition. Then the lumped corundum was coated with the obtained mixture, dried at 150 °C and after that heat-treated under a carbon-bed at $t = 700\div900$ °C. As a result of reducing firing the TiB_2 –C composite material with a carbon content of 15–20 wt.% was formed on the surface of lumped corundum. A qualitative evaluation of the properties of the developed composite coating shows that the coating has a sufficiently high hardness, wear resistance and adhesion to the substrate after the heat treatment. For pilot testing, the repair mixture was covered with molten aluminum to obtain an Al– TiB_2 –C repair mass in the form of plates. The pilot testing of the repair mass on the 400 kA operating electrolyzer in the RUSAL–Sayanogorsk pilot shop showed that the bottom wear have slowed down 3 months after the local fractures were restored without electrolysis bath stops. This fact is evidenced by a 13 % decrease in the average depth of fractures with a stable current value of 4,7–4,8 kA/bloom after repair. Thus, the locally used repair mass slowed that the overall wear of the cathode surface and allowed to extend the electrolyzer life.

Keywords: aluminum electrolyzer, bottom block, restoration, titanium diboride, composite coating, wear.

Nagibin G.E. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), assistant prof. of Designing of buildings and expertise of real estate Department of Institute of Engineering and Construction of Siberian Federal University (SFU) (660074, Russia, Krasnoyarsk, Borisova str., 20). E-mail: Nagibin1@gmail.com.

Zavadyak A.V. — deputy director on high-amperage technology creation of Engineering and Technology Directorate of aluminium production, LLC UC RusAl (660067, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov str., 37/1). E-mail: Andrey.Zavadyak@rusal.com.

Puzanov I.I. — manager, Engineering and Technology Directorate of aluminium production, LLC UC RusAl. E-mail: Iliya.Puzanov@rusal.com.

Proshkin A.V. — Dr. Sci. (Tech.), head of laboratory of carbon and wearing materials of Engineering and Technology Directorate of aluminium production, LLC UC RusAl. E-mail: Aleksandr.Proshkin@rusal.com.

Fedorova E.N. — Cand. Sci. (Tech.), assistant prof. of Applied Mechanics Department of Polytechnic Institute of SFU (660074, Russia, Krasnoyarsk, Borisova str., 20), senior researcher of Institute of Computational Technologies of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (SB RAS), Krasnoyarsk branch (660049, Russia, Krasnoyarsk, Mira str., 53). E-mail: Fefedorova@sfu-kras.ru.

Dobrosmyslov S.S. — Cand. Sci. (Tech.), assistant prof. of Designing of buildings and expertise of real estate Department of Institute of Engineering and Construction of SFU, researcher of Krasnoyarsk Scientific Centre of SB RAS (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok str., 50). E-mail: Dobrosmislov.s.s@gmail.com.

Kirillova I.A. — Cand. Sci. (Tech.), assistant of the Department «Composite materials and physics-chemistry of metallurgical processes» of the Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science of SFU (660122, Russia, Krasnoyarsk, Academic Pavlova str., 77-2). E-mail: Iakirillova17@gmail.com.

Sukhodoeva N.V. — engineer of Applied Mechanics Department of Polytechnic Institute of SFU. E-mail: Suhodoevanadezda@gmail.com.

Citation: Nagibin G.E., Zavadyak A.V., Puzanov I.I., Proshkin A.V., Fedorova E.N., Dobrosmyslov S.S., Kirillova I.A., Sukhodoeva N.V. Development and industrial tests of composite material based on TiB_2 for repair of local destructions in electrolyzer bottom blocks. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 3. P. 12–19 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-12-19.

Введение

Актуальной задачей алюминиевой промышленности, наряду с повышением мощности электролизеров, является создание эффективных, экологически безопасных технологий [1–3]. Увеличение амперной нагрузки и катодной плотности тока, что характерно для высокоамперных электролизеров с обожженными анодами типа РА-400, РА-550, приводит к изменению кинетики физико-химических процессов взаимодействия криолит-глиноземного расплава с углеграфитовой подиной [4]. Катодная подина — один из наиболее уязвимых элементов конструкции электролизера, определяющих срок его службы. Поверхность углеграфитового катода подвергается непрерывному износу со скоростью от 10 до 30 мм/год и выше, при этом скорость износа увеличивается с ростом силы тока и повышением степени графитизации [1, 5].

Наиболее интенсивно процесс износа подового блока протекает в областях с высокими плотностями — в зоне бортовой футеровки непосредственно над блюмсами. Середина подового блока в меньшей степени подвергается эрозии. Таким образом, профиль износа (эрозии) подины стремится к *W*-образной форме [1, 6].

Эрозия катодных блоков является причиной раннего выхода электролизера из строя. Как правило, замена катодной подины (полная или частичная) требует отключения электролизера, слива металла и электролита, демонтажа анодного устройства, удаления остатков застывшего металла и электролита из ванны с последующим удалением изношенной угольной футеровки [7]. Для обновления изношенной подины осуществляют замену некоторых катодных блоков либо на новые, либо на один блок на всю толщину подины из неэлектропроводящего огнеупорного материала, например винипласта [8–12]. Недостатком такого способа являются полная остановка и запуск электролизера, как после капитального ремонта. Кроме того, не обеспечивается монолитность подины, что требует создания временной защиты места ремонта и дополнительных затрат на обслуживание.

Авторским коллективом [13] предложен способ ремонта футеровки без остановки электролизера, включающий предварительную расчистку разрушенных мест и забивку их массой из смеси магнезитового порошка и алюминия. Смесь на-

носят последовательно чередующимися слоями. Данная методика позволяет создать композиционный материал с высокими износостойкостью и электропроводностью благодаря добавке MgCO_3 и пропитке жидким алюминием.

Существуют альтернативные способы ремонта без отключения электролизера, в которых учитывается неравномерный износ подины. Для замедления процесса ее разрушения места максимального износа засыпают смесями разного состава, в частности отходами боя блоков из карбида кремния, периклазовыми порошками с различным гранулометрическим составом или смесью, полученной в результате сплавления фторсодержащих солей (AlF_3 и CaF_2) электролитического производства алюминия [4]. При таких способах ремонта нарушается однородность подины, и значения удельного сопротивления в местах ремонта превышают 10–40 мкОм·см (в зависимости от степени графитизации). В результате происходит перераспределение тока, и степень износа увеличивается на других участках подины. К недостаткам перечисленных способов также относятся применение материалов, не смачиваемых алюминием, и необходимость использования высоких температур для сплавления компонентов, что снижает экономическую эффективность ремонта.

Основная идея предлагаемого в данной работе технического решения — разработать электропроводящий ремонтный материал, характеризующийся высокой износостойкостью при низкой себестоимости ремонта. Реализация этой идеи возможна при использовании смачиваемых алюминием компонентов, существенно повышающих функциональные свойства материала. Наиболее перспективным Al-смачиваемым веществом — основой ремонтного материала — является диборид титана (TiB_2) как жаропрочный материал, обладающий высокой твердостью, низким электросопротивлением, химической стойкостью в жидком алюминии, а также стойкостью к тепловым ударам [14–18]. Применение композиционных покрытий состава TiB_2 —С способствует образованию многочисленных токопроводящих прожилок в объеме материала, заполняющего поврежденные места, что позволяет сохранить токораспределение по блюмсам и предотвратить дальнейший локальный износ подовых блоков [19, 20].

Таким образом, целью данного исследования является разработка состава ремонтного материала с композиционным покрытием на основе TiB_2

и способа ремонта локальных разрушений подины без остановки электролизера. Данное техническое решение позволит уменьшить износ катодной поверхности и продлить срок ее службы.

Исходные материалы и методики исследования

В качестве исходных компонентов для получения ремонтной смеси использовались: корунд (ТУ 3988-012-00658716-2002, производитель АО «РУСАЛ Бокситогорск»), порошок диборида титана РА-2 (ТУ 6-09-03-75, ОАО «УНИХИМ с ОЗ», г. Екатеринбург) и технологическая добавка — огнеупорное связующее (ОАО «Полипласт-УралСиб», г. Первоуральск), представляющая собой сульфированные продукты реакции взаимодействия нафталина с формальдегидом с коксовым остатком не менее 15 мас.% (ТУ 5746-062-58042865-2011).

Гранулометрический состав исходных порошков TiB_2 определяли с помощью лазерного прибора для измерения размера частиц «Analysette 22 MicroTec plus» (Fritsch, Германия) согласно методике ISO 13320:2009. Качественный анализ кристаллических фаз исходных порошков диборида титана методом рентгенофазового анализа (РФА)

проводили на рентгеновском дифрактометре «D8 Advance» (Bruker, Германия) с применением CuK_{α} -излучения ($\lambda = 0,15406 \text{ \AA}$), диапазон съемки — $2\theta = 10 \div 75$ град с шагом 0,07 град. Рентгено-спектральный анализ (РСА) образцов осуществляли на автоматизированном волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония) с Rh-анодом. Морфологию поверхности, форму и размеры частиц порошка TiB_2 исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM 6490-LV (JEOL, Япония). Твердость и прочность адгезии композиционного покрытия на основе TiB_2 определяли при нанесении материала на корундовую подложку с использованием динамического твердомера ТН-130 (Китай) и при испытаниях на растяжение (согласно ISO 4624:2002) специально подготовленных образцов на универсальной испытательной машине Instron 3369 (Великобритания). Удельное электро-сопротивление композиционного материала измеряли четырехзондовым методом (ГОСТ 23776-79).

При проведении опытно-промышленных испытаний ремонтной смеси контроль массовой доли титана в алюминии проводился в условиях опытного участка ОАО «РУСАЛ Саяногорск» на оптико-эмиссионном спектрометре ARL3560 (ThermoARL, Швейцария) согласно СТП-4.82.12-

Таблица 1
Характеристики исходных материалов

Материал	Химический состав, мас.%			Физические свойства	
				Кажущаяся плотность, г/см ³	Гранулометрический состав, мм
Диборид титана	TiB_2	Mg	Fe	2,5	0–0,1
	>98	≤0,1	≤0,1		
Корунд	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	1,7	1–10
	95,5	0,1	0,4		

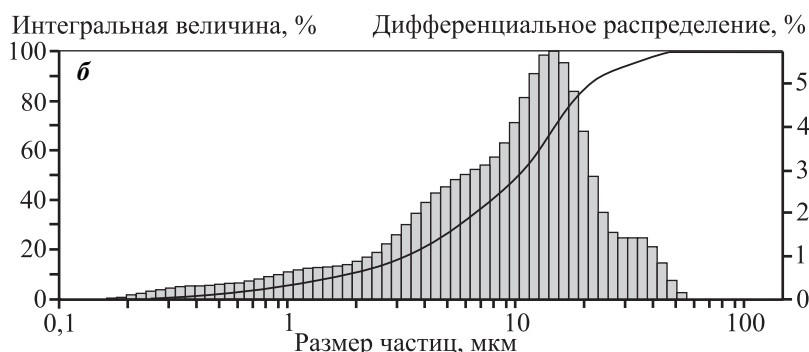
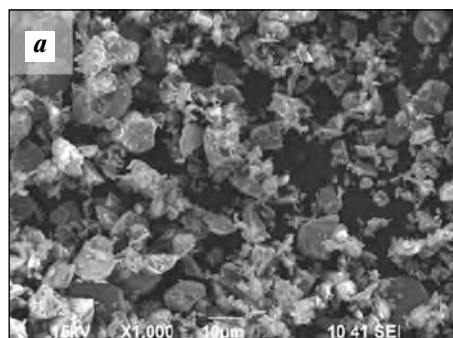


Рис. 1. СЭМ-микрофотография (а) и результаты гранулометрического анализа (б) исходного порошка TiB_2

2012 «Алюминий первичный и деформируемый. Метод оптической атомно-эмиссионной спектроскопии определения массовых долей примесей». Контроль распределения тока по блямсам осуществлялся в соответствии с методиками, действующими в ОАО «РУСАЛ Саяногорск», с использованием измерителя постоянного тока ИПТ 2010 (ЗАО «Краспромавтоматика», г. Красноярск).

Характеристики исходных компонентов ремонтной смеси приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведены микрофотография исходного порошка диборида титана и результаты granulometricheskogo анализа.

Порошок TiB_2 характеризуется пластинчатой формой частиц, их средний размер — 10 мкм. Насыпная и истинная плотности порошка составляют 1,3 и 4,1 г/см³ соответственно.

Способ получения ремонтной смеси

Для получения ремонтной смеси порошок TiB_2 смешивали с водным раствором огнеупорного порошкообразного связующего до получения однородной массы. Затем неформованный корунд покрывали этой смесью и сушили при $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обжиг материала проводили в углеродной засыпке в контейнере из жаропрочной стали в лабораторной камерной печи ПВК 1,4-36 при $t = 700\div 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Необходимость использования восстановительной среды обусловлена активным процессом окисления TiB_2 при температурах выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Согласно [21] добавка углерода при разложении термопласта, применяемого в качестве огнеупорного связующего, позволяет увеличить электропроводность композиционного покрытия на основе TiB_2 на ~10 %. Однако превышение кри-

тической концентрации связующего приводит к потере смачиваемости материала алюминием и увеличению усадки материала из-за удаления летучих продуктов разложения. В этой связи были проведены исследования по подбору оптимальных составов композиционного покрытия. В результате установлено, что критическая концентрация связующего составляет 70 %. Превышение указанного значения приводит к вспучиванию покрытия при сушке и дальнейшем обжиге.

Другим важным технологическим параметром является вязкость композиции. Экспериментально было выявлено, что она должна находиться в пределах 400—700 мПа·с. При большей вязкости нанесение композиции на неформованный корунд ровным слоем затруднено. Указанному интервалу вязкости соответствует состав (мас.%) 50 TiB_2 — 50 связующее.

В результате обжига в восстановительной среде на поверхности неформованного корунда формируется композиционный материал TiB_2 —C с содержанием углерода 15 мас.%, которое определялось методом РСА. Для повышения точности анализа было также определено содержание углерода в образцах гравиметрическим методом по потере массы при прокаливании (на воздухе при $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч).

Необходимо отметить, что данный состав (85 TiB_2 —15C, мас.%) удовлетворяет экономическим требованиям, так как частичная замена дорогостоящего TiB_2 углеродом снижает себестоимость материала, используемого для ремонта локальных разрушений подовых блоков [22, 23].

Для оценки смачиваемости алюминием полученного композиционного материала покрытия были изготовлены образцы отливок (рис. 2, а),

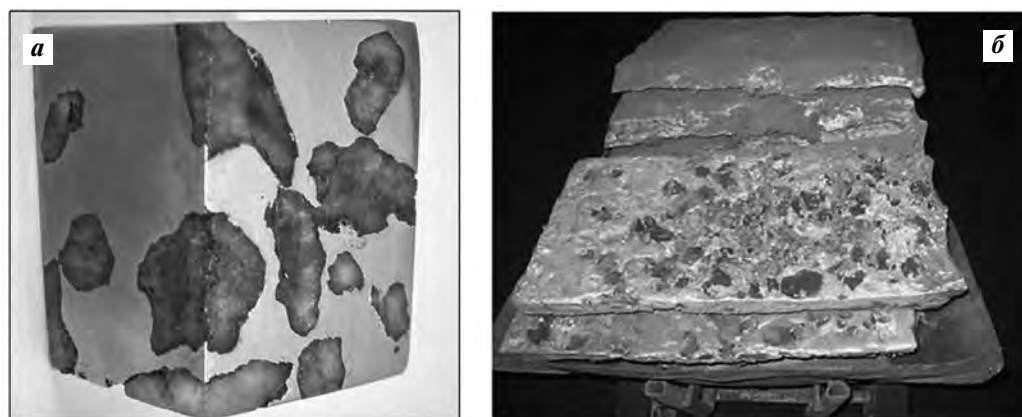


Рис. 2. Срезы композита после заливки расплавленным алюминием (а) и ремонтная масса в виде плит для опытно-промышленных испытаний (б)

которые получали погружением неформованного корунда с покрытием TiB_2-C в расплавленный алюминий ($t = 800\text{ }^{\circ}C$).

Твердость разработанного композиционного покрытия составляла 327 ± 10 НВ, прочность адгезии — 2,4 МПа, удельное электросопротивление — $35 \div 70$ мкОм·м.

Реализованная в лабораторных условиях последовательность технологических операций получения ремонтного материала (получение ремонтной смеси порошка TiB_2 и связующего; покрытие неформованного корунда полученной смесью; сушка и обжиг покрытия; погружение неформованного корунда с покрытием TiB_2-C в расплавленный алюминий) была использована для проведения опытно-промышленных испытаний при локальном ремонте подовых блоков на действующем электролизере РА-400 в опытном цехе ОАО «РУСАЛ-Саяногорск». После заливки ремонтной смеси, которая представляет собой неформованный корунд с композиционным покры-

тием TiB_2-C , расплавленным алюминием была получена масса в виде плит (рис. 2, б).

Опытно-промышленные испытания ремонтной смеси

Ремонт локальных разрушений катодной подины проводили без остановки электролизера. Была исследована топография катодной поверхности для определения местоположения и глубины повреждений (каверн). Топографические замеры производились погружением шупа в расплав электролита и жидкого алюминия в различных точках по всей катодной поверхности. Топографическая карта износа подины электролизера со сроком службы 55 мес. приведена на рис. 3.

По данным проведенных замеров средняя глубина каверн составляет 6,8 см (табл. 2). Были установлены участки, где износ происходит почти в 3 раза интенсивнее. Именно на этих участках осуществлялся локальный ремонт. Каверны

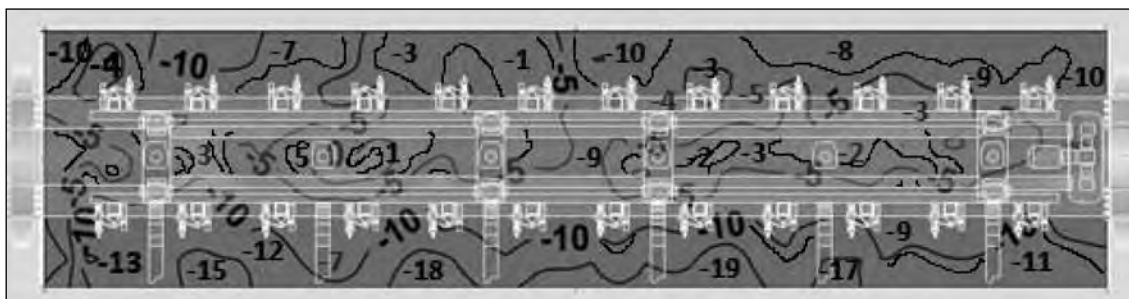


Рис. 3. Топографическая карта разрушения подины электролизера РА-400 относительно первоначального состояния (срок службы — 55 мес., цифрами обозначена степень глубины износа, %)

Таблица 2

Сравнительные значения глубины повреждений катодного участка относительно первоначального состояния и токораспределение по бломам электролизера РА-400 до и после ремонта локальных разрушений подины

Проведение замеров	Среднее значение	Мода	СКО	Max	Min
Глубина повреждения, см					
До ремонта	–6,8	–5	3,86	–18	5
После ремонта через 3 мес.	–5,9	–8	2,88	–10	4
Δ	↓0,9	↑–3	↓–0,98	↓8	↓–1
Сила тока, кА/блумс					
До ремонта	4,79	5,3	0,79	3	6,1
После ремонта через 3 мес.	4,75	5,5	0,75	3	6
Δ	–0,04	0,2	–0,04	0	–0,1
Примечание. СКО — среднееквадратичное отклонение; Δ — изменение величины после проведения локального ремонта; ↓/↑ — уменьшение/увеличение значений.					

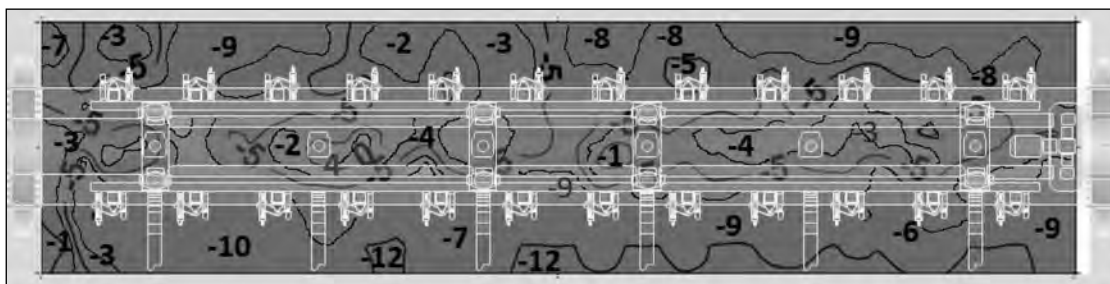


Рис. 4. Топографическая карта подины электролизера РА-400 через 3 мес. после проведения локального ремонта (срок службы – 58 мес., цифрами обозначена степень глубины износа, %)

заполнялись плитами предварительно подготовленной ремонтной массы (см. рис. 2, б). Направление погружения задавалось с помощью металлических стержней, расположенных по границам каверны.

После локального ремонта осуществлялся контроль состояния подины в процессе эксплуатации. Испытания ремонтной массы проводили в течение 3 мес. Для этого выполняли регулярный отбор проб металла и их анализ на содержание примесей методом оптической атомно-эмиссионной спектрометрии. Технологические замеры позволяли контролировать режим работы электролизера, в том числе токораспределение по блодам. После локального ремонта также повторяли топографические замеры по поверхности подины.

На рис. 4 приведена топографическая карта поверхности подины электролизера РА-400 через 3 мес. после ремонта локальных разрушений подины. При сравнении рис. 3 и 4 видно, что благодаря проведенному локальному ремонту с использованием разработанного композиционного материала износ подины удается замедлить.

В табл. 2 приведены значения глубины повреждений катодного участка относительно первоначального состояния и токораспределение по блодам электролизера РА-400 до и после ремонта локальных разрушений подины. Видно, что при стабильных значениях силы тока (4,75 кА/блюд) средняя глубина повреждений уменьшилась. Несмотря на то, что величина моды увеличилась, т.е. общий износ подины продолжается, разрушение наиболее уязвимых участков катода после проведения локального ремонта замедлилось. Об этом факте свидетельствует уменьшение среднего значения глубины повреждения при стабильном значении силы тока.

По состоянию на момент замеров после ремонта возраст опытного электролизера РА-400 состав-

лял 58 мес., разрушение подины и нарушение токораспределения по блодам не наблюдались.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны состав и технология получения материала, состоящего из неформованного корунда с композиционным покрытием TiB_2-C , смачиваемого алюминием, для ремонта локальных разрушений подовых блоков без остановки электролизера.

Опытно-промышленные испытания подтверждают эффективность предложенного технического решения. Исследования топографии подины до и после ремонта показали, что локальное использование ремонтной массы замедлило износ катодной поверхности и позволило продлить срок службы электролизера на 6 мес.

Работа выполнена в рамках проекта 02. G25.31.0181 «Разработка сверхмощной энергоэффективной технологии получения алюминия РА-550» по Программе реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

Литература/References

1. Sorlie M., Øye H.A. Cathodes in aluminium electrolysis. 3-rd ed. Dusseldorf: Aluminium-Verlag Marketing and Kommunikation GmbH, 2010.
2. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России. *Цвет. металлы*. 2016. No. 1. С. 32–38.
Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategy of the metallurgical industry of Russia. *Tsvetnyye metally*. 2016. No. 1. P. 32–38 (In Russ.).
3. Фещенко Р.Ю. Интенсификация процесса высокоамперного электролиза криолитоглиноземных расплавов в пусковой период: Дис. ... канд. техн. наук. СПб: Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный», 2014.

- Feshchenko R.Yu.* Intensification of the electrolysis of high-amperage of cryolite-alumina melts during the start-up period: Dissertation of PhD. Saint-Petersburg: National Mineral and Raw University «Gornyi», 2014 (In Russ.).
4. *Юрков А.Л.* Проблема материаловедения углеродных подовых блоков для алюминиевых электролизеров. *Росс. хим. журн.* 2006. Т. 50. No. 1. С. 35—42.
Yurkov A.L. The problem of materials science of carbon bottom blocks for aluminum cells. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2006. Vol. 50. No. 1. P. 35—42 (In Russ.).
 5. *Rafiei P., Hiltmann F., Hyland M., James B., Welch B.* Electrolytic degradation within cathode materials. *Light Metals*. 2001. P. 747—752.
 6. *Øye H.A., Welch B.J.* Cathode performance: The influence of design, operations, and operating conditions. *JOM*. Vol. 50. Febr. 1998. P. 18—23.
 7. *Костюков А.А.* Справочник металлурга по цветным металлам. М.: Metallurgiya, 1971. С. 248—250.
Kostukov A.A. The metallurgist's guide on non-ferrous metals. Moscow: Metallurgiya, 1971. P. 248—250 (In Russ.).
 8. *Матвеевичев А.Н., Горбунов В.А., Коршунов А.Ф.* Способ горячего ремонта футеровки электролизера: Пат. 3793386/22-02 (СССР). 1986.
Matveichev A.N., Gorbunov V.A., Korshunov A.F. A method for hot patching of the cell lining: Pat. 3793386/22-02 (USSR). 1986 (In Russ.).
 9. *Yurkov A.L.* Refractories and carbon cathode materials for the aluminum industry. Chapter 2. Refractories and carbon cathode blocks for electrolytic production of aluminum. *Refract. Ind. Ceram.* 2005. Vol. 46. No. 6. P. 365—760.
 10. *Чанг Х.* Материалы, используемые в производстве алюминия методом Эру-Холла. Пер. с англ. П. Полякова. Красноярск: КГУ, 1998.
Chang Kh. Materials used in the production of aluminum by the Héroult-Hall method. Engl. transl. P. Polyakov. Krasnoyarsk: KGU, 1998 (In Russ.).
 11. *Парамонов С.А., Рагозин Л.В., Ефимов А.А., Горковенко В.И., Пухнаревич В.П.* Способ горячего ремонта локальных разрушений углеродистой подины катодного устройства алюминиевого электролизера: Пат. 2270886 (РФ). 2006.
Paramonov S.A., Ragozin L.V., Efimov A.A., Gorkovenko V.I., Pukhnarevich V.P. A method for the hot patching of localized failure of the carbonaceous bottom of the cathode device of an aluminum electrolysis cell: Pat. 2270886 (RF). 2006 (In Russ.).
 12. *Кореневский А.Д., Дмитриев В.А., Крячко К.Н., Мамиллов В.В.* Многоблочный проточный электролизер для извлечения металлов из растворов их солей: Пат. 2109088C1 (РФ). 1996.
Korenevskii A.D., Dmitriev V.A., Kryachko K.N., Mamilov V.V. Multi-block flow electrolyzer for the extraction of metals from their salts solutions: Pat. 2109088C1 (RF). 1996 (In Russ.).
 13. *Nora V., Duruz J.-J., Cronin B.* Composite cell bottom for aluminum electrowinning: Pat. 5203971 (USA). 1993.
 14. *Devyatkin S.V.* Chemical and electrochemical behavior of titanium diboride in cryolite-alumina melt and in molten aluminum. *J. Solid State Chem.* 2000. Vol. 154. No. 1. P. 107—109.
 15. *Самсонов Г.В., Панасюк А.Д., Боровикова М.С.* Контактное взаимодействие тугоплавких соединений с жидкими металлами. *Порошк. металлургия*. 1973. No. 6. С. 51.
Samsonov G.V., Panasyuk A.D., Borovikova M.S. Contact interaction of refractory compounds with liquid metals. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1973. No. 6. P. 51 (In Russ.).
 16. *Минцис М.Я.* Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001.
Mintsis M.Ya. Aluminium electrometallurgy. Novosibirsk: Nauka, 2001 (In Russ.).
 17. *Finch C.B.* Crack formation and swelling of TiB₂—Ni ceramics in liquid aluminum. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1982. Vol. 65. Iss. 7. P. 100—101.
 18. *Li J., Lu X.-j., Lai Y.-q., Li Q.-y., Liu Y.-x.* Research progress in TiB₂ wettable cathode for aluminum reduction. *JOM*. 2008. No. 8. P. 32—37.
 19. *Ibrahiem M.O., Foosnes T., Øye H.A.* Properties of pitch and furan-based TiB₂—C cathodes. *Light Metals*. 2008. P. 1013—1018.
 20. *Novak B.* Fundamentals of aluminium carbide formation. *Light Metals*. 2012. P. 1343—1348.
 21. *Li J.* Electrical resistivity of TiB₂/C composite cathode coating for aluminum electrolysis. *J. Central South Univ. Technol.* 2006. Vol. 13. No. 3. P. 209—213.
 22. *Пузанов И.И., Завадяк А.В., Прошкин А.В., Нагибин Г.Е., Добросмыслов С.С., Фёдорова Е.Н.* Способ горячего ремонта локальных разрушений подины алюминиевого электролизера: Пат. 2629421 (РФ). 2017.
Puzanov I.I., Zavadyak A.V., Proshkin A.V., Nagibin G.E., Dobrosmyslov S.S., Fedorova E.N. A method for the hot patching of localized failure of the bottom of an aluminum electrolysis cell: Pat. 2629421 (RF). 2017 (In Russ.).
 23. *Нагибин Г.Е., Пузанов И.И., Завадяк А.В., Прошкин А.В., Добросмыслов С.С., Фёдорова Е.Н.* Повышение ресурса алюминиевого электролизера за счет горячего локального ремонта подины. В сб.: *Матер. IX Междунар. конгр. «Цветные металлы и минералы»* (г. Красноярск, 11—15 сент. 2017 г.). Красноярск: Науч-иннов. центр, 2017. С. 334—337.
Nagibin G.E., Puzanov I.I., Zavadyak A.V., Proshkin A.V., Dobrosmyslov S.S., Fedorova E.N. Increase of the resource of the aluminum cell due to hot local patching of the bottom. In: *Collection of materials of IX Intern. congress of non-ferrous metals and minerals* (Krasnoyarsk, 11—15 Sept. 2017). Krasnoyarsk: Science and Innovation Centre Publ. House, 2017. P. 334—337 (In Russ.).