

Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЧУГУНОВ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ В СРЕДЕ АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ
ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**

© 2023 г. Е. А. Пинаев¹, М. В. Темлянцев², А. И. Куценко², А. С. Симачев², О. В. Бессонова³

¹АО «Русал Красноярск» (660111, Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Пограничников, 40)

²Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (654043, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Проведено исследование коррозионной стойкости низколегированных чугунов в среде анодных газов алюминиевых электролизеров. При проведении экспериментов использованы чугуны не легированные и легированные хромом, алюминием, совместно хромом и алюминием. Исследуемые образцы и составы чугунов отличаются химическим составом, структурой основы, формой нахождения углерода в структуре и формой графита. Продолжительность эксперимента составила 384 сут. Коррозионную стойкость чугунов определяли по потерям массы образцов и удельным потерям массы с единицы поверхности в единицу времени. Из исследуемых составов наиболее высокой коррозионной стойкостью обладает чугун, содержащий минимальное количество алюминия и хрома. Потери массы образцов составили 33,8 %, а удельные потери $1,71 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Основа чугуна феррито-перлитная, графит имеет хлопьевидную форму. Чугуны легированные алюминием в количестве 0,64 % и легированные алюминием в количестве 2,74 % и хромом 1,83 % имеют близкие показатели коррозионной стойкости. Потери массы образцов составили 48,6 и 49,4 %, а удельные потери $2,57 \cdot 10^{-4}$ и $2,51$ г/(см²·ч) соответственно. Графит в таких чугунах имеет хлопьевидную форму. Чугун легированный алюминием в количестве 5,51 % имеет относительно низкие показатели коррозионной стойкости. Потери массы образцов составили 64,4 %, а удельные потери $3,22 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Графит в структуре такого чугуна имеет пластинчатое строение. Минимальная коррозионная стойкость характерна для образцов из чугуна с содержанием хрома 1,83 %. Потери массы образцов составили 74,0 %, а удельные потери $3,30 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Характерно, что чугун этого состава не содержит выделений графита, углерод в его составе находится в виде карбидов.

Ключевые слова: чугун, газовая коррозия, электролизер

Для цитирования: Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Куценко А.И., Симачев С.А., Бессонова О.В. Исследование стойкости чугунов к высокотемпературной газовой коррозии в среде анодных газов электролизеров экосодерберг // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 87–94. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)

Original article

**INVESTIGATION OF THE RESISTANCE OF CAST IRON TO HIGH-TEMPERATURE
GAS CORROSION IN THE ENVIRONMENT OF ANODE GASES OF ALUMINUM
ELECTROLYZERS**

© 2023 E. A. Pinaev¹, M. V. Temlyantsev², A. I. Kutsenko², A. S. Simachev², O. V. Bessonova³¹JSC «RUSAL – Krasnoyarsk» (40, str. Border guards, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Krai, 660111, Russian Federation)²Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass 654007, Russian Federation)³EVRAZ ZSMK JSC (16, sh. Cosmic, Novokuznetsk, Kemerovo Oblast - Kuzbass, 654043, Russian Federation)

Abstract. A study of the corrosion resistance of low-alloy cast iron in the environment of anodic gases of aluminum EcoSoderberg electrolyzers was carried out. During the experiments, cast irons not le-gated and alloyed with chromium, aluminum, together with chromium and aluminum were used. The studied samples and compositions of cast iron differ in chemical composition, the structure of the base, the form of carbon in the structure and the form of graphite. The duration of the experiment was 384 days. The corrosion resistance of cast iron was determined by the mass loss of samples and specific mass loss per unit surface per unit time. Of the studied compositions, cast iron containing a minimum amount of aluminum and chromium has the highest corrosion resistance. The mass loss of the samples was 33.8 %, and the specific loss was $1.71 \cdot 10^{-4} \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{h)}$. The base of cast iron is ferrite-pearlite, graphite has a flake shape. Cast iron alloyed with aluminum in an amount of 0.64 % and alloyed with aluminum in an amount of 2.74 % and chromium 1.83 % has similar corrosion resistance indicators. The mass losses of the samples were 48.6 and 49.4 %, and the specific losses were $2.57 \cdot 10^{-4}$ and $2.51 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{h)}$, respectively. Graphite in such cast irons has a flake-like shape. Cast iron alloyed with aluminum in an amount of 5.51 % has relatively low corrosion resistance indicators, the weight loss of the samples was 64.4 %, and the specific loss was $3.22 \cdot 10^{-4} \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{h)}$. Graphite in the structure of such cast iron has a lamellar structure. Minimum corrosion resistance is typical for cast iron samples with a chromium content of 1.83 %. The mass loss of the samples was 74.0 %, and the specific loss was $3.30 \cdot 10^{-4} \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{h)}$. It is characteristic that cast iron of this composition does not contain graphite secretions, carbon in its composition is in the form of carbides.

Keywords: cast iron, gas corrosion, electrolyzer

For citation: Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Kutsenko A.I., Simachev S.A., Bessonova O.V. Investigation of the resistance of cast iron to high-temperature gas corrosion in the environment of anode gases of ecosoderberg electrolyzers. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 2 (44), pp. 87–94. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)

Одним из эффективных направлений снижения количества вредных выбросов при производстве первичного алюминия является применение технологии ЭкоСодерберг. По данным работы [1] перевод производящих алюминий предприятий на технологию ЭкоСодерберг позволяет снизить количество выбросов фторидов в 3,5 раза (с 2,5 – 3,5 до 0,72 кг/т); пыли – в 3,5 раза (с 11 – 16,9 до 1,8 – 3,6 кг/т); диоксида серы – в 1,5 – 2 раза (с 1,5 – 2,3 до не более 1,0 кг/т); смолистых веществ – в 1,5 раза (с 1,5 – 2,24 до 0,89 – 1,38 кг/т).

Новая технология предполагает ряд изменений в конструкции алюминиевых электролизеров Содерберг. В частности, изменения коснулись газосборного колокола (ГСК). Рост силы тока электролизеров и увеличение объемов образующихся газов привели к необходимости увеличения ширины пояса газосборного колокола, изменения конфигурации секций ГСК с трапецевидной на параболическую. Это обеспечило увеличение поперечного сечения подкупольного пространства в 1,2 – 1,5 раза и снижение его аэродинамического сопротивления более чем в два раза. Не менее важным решением стало применение горелочных устройств увеличенного диаметра с «узкими» воздухозаборными ще-

лями, которые обеспечивают полноту сжигания горючих компонентов анодного газа за счет увеличения времени их пребывания в зоне высоких температур и более интенсивного смешивания компонентов [2, 3].

Переход на технологию ЭкоСодерберг привел к значительному изменению условий службы секций газосборного колокола, которые изготавливаются по литейным технологиям из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (марки ВЧ50). В частности, температура газов в центральных куполах системы газоудаления увеличилась до 800 °С, а максимальные температуры чугуновых секций до 600 – 620 °С [4].

Повышение температуры в совокупности с воздействием агрессивной атмосферы, которая в общем случае может содержать газообразные компоненты (HF, CF₄, C₂F₆, SiF₄, SO₂, SO₃, H₂S, CS₂, COS, CO₂, CO), оксиды ванадия, смолистые вещества и твердые частицы (С (углеродная сажа), Al₂O₃, Na₃AlF₆, Na₅Al₃F₁₄, K₂NaAlF₆, AlF₃, CaF₂, MgF₂) [5] привели к интенсификации коррозии чугуновых секций газосборного колокола и значительному снижению срока их службы [4].

Усредненный химический состав экспериментальных чугунов
Average chemical composition of experimental cast iron

Образец	Содержание элемента, % (по массе)										
	C	Mn	Si	Al	Cr	Ni	P	S	V	Mo	Cu
1	2,73	0,58	0,55	5,51	0,02	0,06	0,067	0,013	0,04	0,006	0,04
2	3,53	0,60	0,57	0,64	0,03	0,06	0,076	0,014	0,05	0,007	0,04
3	3,80	0,54	0,54	0,01	1,83	0,07	0,067	0,015	0,05	0,007	0,05
4	3,29	0,52	0,56	2,74	1,83	0,07	0,035	0,014	0,04	0,007	0,04
5	3,31	0,62	0,59	0,02	0,03	0,06	0,071	0,015	0,05	0,007	0,04

В справочной литературе [6 – 12] для условий, близких к условиям службы секций ГСК, рекомендуют чугуны, легированные кремнием, алюминием, хромом, а непосредственно для деталей защитного кожуха алюминиевых электролизеров – высокохромистый чугун марки ЧХ30 [13]. В работах [14, 15] показано, что высокой стойкостью к процессам коррозии в газовой атмосфере алюминиевых электролизеров обладают чугуны с содержанием алюминия не менее 7,5 – 8,0 %. Высоко- и комплекснолегированные чугуны повышают себестоимость чугунных секций, также повышаются предъявляемые требования к технологиям их производства [16]. Именно поэтому разработка составов и исследование коррозионной стойкости низколегированных и экономнолегированных чугунов в атмосфере анодных газов алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг является актуальной научно-практической задачей современного металловедения.

В настоящей работе проведены исследования процессов высокотемпературной газовой коррозии низколегированных чугунов легированных алюминием, хромом и совместно хромом и алюминием в атмосфере анодных газовых алюминиевых электролизеров. Для оценки влияния легирующих элементов в качестве материала для сравнения использован чугун аналогичного состава, но не содержащий алюминия и хрома.

Усредненные химические составы исследуемых чугунов представлены в табл. 1.

Выплавку чугунов проводили в индукционной печи. Из чугунов отливали образцы в форме пластин длиной 80 мм, шириной 80 мм и толщиной 20 – 30 мм. Масса образцов составляла 0,7 – 1,0 кг. Для получения наиболее достоверных результатов исследования коррозионной стойкости чугунов проводили в условиях действующего производства. Образцы посредством болтового соединения крепили к внутренней поверхности чугунной секции и устанавливали в конструкцию газосборного колокола (рис. 1) [17]. Таким образом, образцы находились во внутреннем пространстве электролизера и подвергались агрессивному воздействию температуры и газовой среды аналогично секции ГСК. Эксперименты проводили на промышленных электролизерах. Продолжительность экспериментов составляла 384 сут.

По завершении экспериментов секцию и образцы демонтировали. Механическим способом образцы очищали от продуктов коррозии [18] и взвешивали на лабораторных весах. Стойкость чугунов к высокотемпературной газовой коррозии определяли по удельным потерям массы U образцов с единицы поверхности в единицу времени.



а



б

Рис. 1. Общий вид образцов на секции до (а) и после (б) эксплуатации
 Fig. 1. General view of the samples on the section before (a) and after (b) operation

Для исследования микроструктуры чугунов применяли оптический металлографический микроскоп OLYMPUS GX-51 и сканирующие электронные микроскопы KYKY-EM 6900 и Tescan mira 3. Твердость чугунов измеряли на твердомере ТК-2М. В табл. 2 представлено описание микроструктуры, твердость и удельные потери массы исследуемых чугунов. На рис. 2 показана характерная микроструктура исследуемых чугунов после экспериментов.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что рассматриваемые чугуны являются низколегированными, доэвтектическими [12]. Продолжительная (384 сут.) эксплуатация, сопровождающаяся изменениями температуры секции от 600 до 800 °С, привела к определенным структурным изменениям формы графита и перлита чугуна.

Наиболее высокой коррозионной стойкостью обладает чугун состава 5, содержащий минимальное количество алюминия и хрома. Потери массы образцов составили 33,8 %, а удельные потери $1,71 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Основа чугуна феррито-перлитная, графит имеет хлопьевидную форму. Образцы после удаления продуктов коррозии имеют внешний вид, близкий к исходному. Коррозия по поверхности образцов равномерная.

Чугун составов 2 (легированный алюминием в количестве 0,64 %) и 4 (легированный алюминием в количестве 2,74 % и хромом 1,83 %) имеет близкие показатели коррозионной стойкости. Потери массы образцов составили 48,6 и 49,4 %, а удельные потери $2,57 \cdot 10^{-4}$ и $2,51 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч) соответственно. Графит в чугуне составов 2 и 4 имеет хлопьевидную форму. Чугун состава 2

имеет самую низкую твердость 116 – 118 НВ. Для чугуна состава 4 характерна более высокая твердость: 202 – 228 НВ.

Чугун состава 1, легированный алюминием в количестве 5,51 %, имеет относительно низкие показатели коррозионной стойкости. Потери массы образцов составили 64,4 %, а удельные потери $3,22 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Графит в структуре такого чугуна имеет пластинчатое строение.

Минимальная коррозионная стойкость характерна для образцов из чугуна состава 3, с содержанием хрома 1,83 %. Потери массы образцов составили 74,0 %, а удельные потери $3,30 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч), то есть фактически в два раза больше, чем у чугуна состава 5. Характерно, что чугун состава 3 не содержит выделений графита, углерод в его составе находится в виде карбидов. Твердость такого чугуна максимальна из всех исследуемых составов и находится на уровне 302 – 341 НВ. Визуальный анализ образцов из этого чугуна после демонтажа с поверхности секций показал, что они содержат следы сильного коррозионного разрушения, на поверхности присутствуют глубокие каверны, в некоторых участках сквозной прогар.

Исследуемые образцы и составы чугунов отличаются химическим составом, структурой основы, формой нахождения углерода в структуре и формой графита. Полученные данные в целом согласуются с существующими представлениями о коррозионной стойкости чугунов и влиянии на нее различных факторов. Низкохромистые чугуны имеют практически такую же коррозионную стойкость, как и серый чугун. Высоко-

Таблица 2

Микроструктура, твердость и удельные потери массы исследуемых чугунов
Microstructure, hardness and specific mass loss of the studied cast irons

Образец	Микроструктура чугуна	Твердость, НВ	$U \cdot 10^4$ г/(см ² ·ч)	Потери массы образца, %
1	Ферритная основа, графит имеет пластинчатое строение	148 – 153	3,22	64,4
2	Феррито-перлитная основа, графит хлопьевидный	116 – 118	2,57	48,6
3	Структура доэвтектического белого чугуна, состоит из ледебуритной эвтектики + перлита + карбидов, графит в свободном виде отсутствует	302 – 341	3,30	74,0
4	Феррито-перлитная основа, форма графита пластинчатая, трансформировалась в хлопьевидную в процессе эксплуатации	202 – 228	2,51	49,4
5	Основа феррито-перлитная, графит имеет сферическую форму, трансформировавшуюся в хлопьевидную в процессе эксплуатации	143 – 153	1,71	33,8

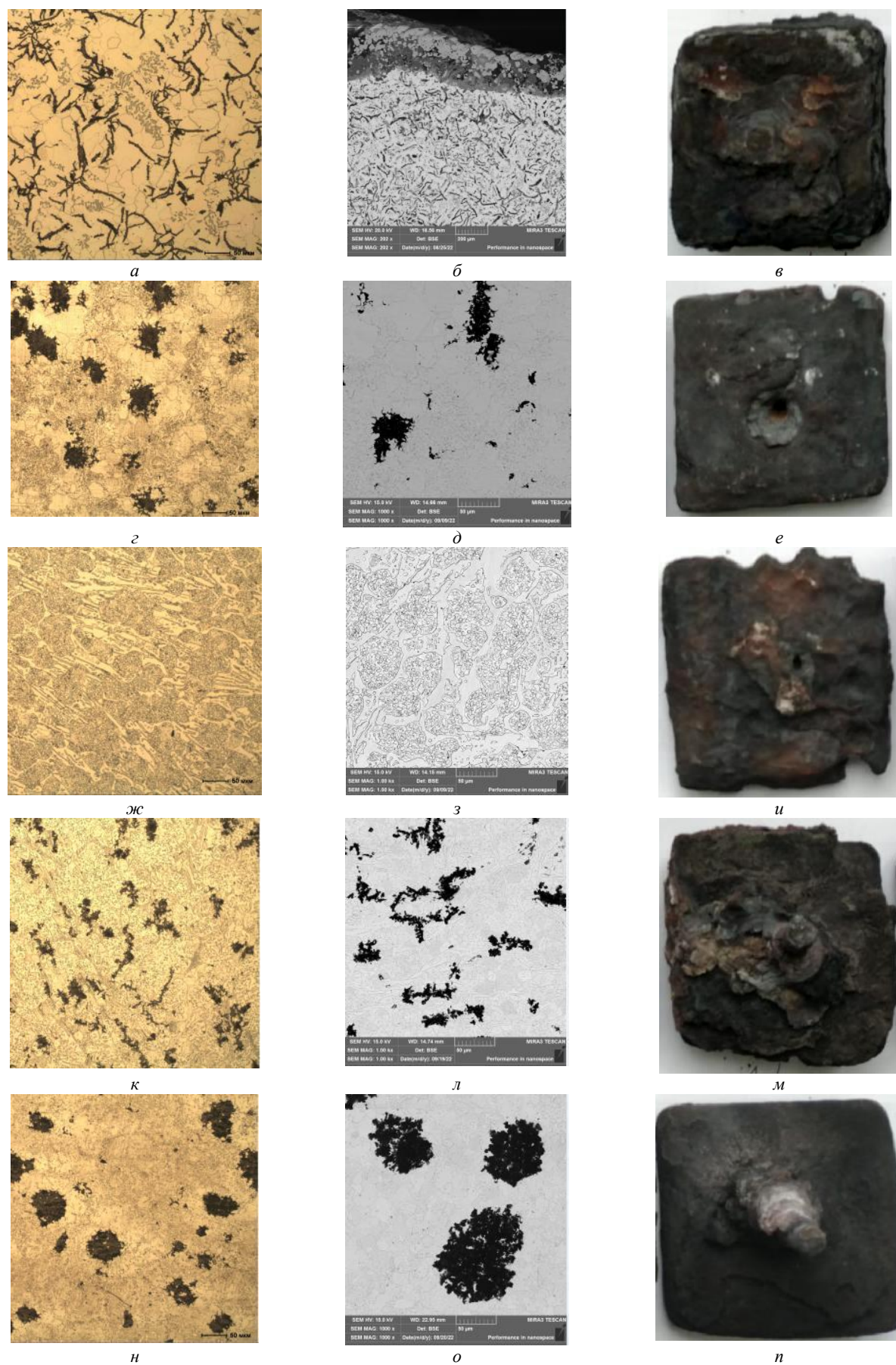


Рис. 2. Микроструктура исследуемых чугунов составов 1 (а – в), 2 (з – е), 3 (ж – и), 4 (к – м), 5 (н – п) и общий вид образцов (в, е, и, м, п) после демонтажа (а, з, ж, к, н – оптическая микроскопия; б, д, з, л, о – электронная микроскопия)
 Fig. 2. Microstructure of the studied cast iron compositions 1 (а – в), 2 (з – е), 3 (ж – и), 4 (к – м), 5 (н – п) and the general view of the samples (в, е, и, м, п) after dismantling (а, з, ж, к, н – optical microscopy; б, д, з, л, о – electron microscopy)

прочный чугун с шаровидным графитом, как правило, более устойчив к коррозии по сравнению с серым чугуном. Наличие графита в виде разобщенных сфероидных включений препятствует проникновению окислительного агента в глубь матрицы, окисление в таком чугуне идет практически только с поверхности, в то время как в сером чугуне, имеющем рассеченную пластинчатый графитом матрицу, процесс окисления захватывает не только поверхность, но и внутреннюю (по графитовым включениям) часть образца [13].

Влияние формы графитовых частиц на коррозионную стойкость подтверждено в работах [19, 20], в которых показано, что уменьшение площади межфазной поверхности графита и металлической основы способствует повышению коррозионной стойкости чугуна с шаровидным графитом.

Поскольку коррозионные процессы протекают по границам раздела фаз, то доэвтектический белый чугун состава 3, состоящий из ледебуритной эвтектики, перлита и карбидов, имеет в этом плане менее благоприятную структуру.

Вывод

В результате проведенных в промышленных условиях исследований установлено, что наиболее высокой коррозионной стойкостью в атмосфере анодных газов электролизеров ЭкоСодерберг из исследуемых низколегированных чугунов обладает чугун состава 5, содержащий минимальное количество алюминия и хрома. Потери массы образцов составили 33,8 %, а удельные потери $1,71 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч). Основа чугуна феррито-перлитная, графит имеет хлопьевидную форму. Наименьшую коррозионную стойкость имеет состав 3 с содержанием хрома 1,83 %. Потери массы образцов составили 74,0 %, а удельные потери $3,30 \cdot 10^{-4}$ г/(см²·ч), то есть фактически в два раза больше, чем у состава 5. Характерно, что чугун состава 3 не содержит выделений графита, углерод в его составе находится в виде карбидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сибгатулин В.Г., Шишацкий Н.Г. Красноярский алюминиевый завод: экологический фактор // ЭКО. 2018. № 4. С. 48–66.
2. Шахрай С.Г. Современное состояние атмосферы корпусов производства алюминия и методы ее нормализации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. № 5. С. 638–646.
3. 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 Содерберга //

- Металлургия цветных металлов. 2017. № 1. С. 19–30.
4. Юрьев А.Б., Темлянец М.В., Деев В.Б., Феоктистов А.В., Пинаев Е.А. Коррозия чугунных секций газосборного колокола электролизеров ЭкоСодерберг // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 883–890. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-883-890>
5. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
6. Гиршович Н.Г. Справочник по чугунному литью. Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1978. 758 с.
7. Шерман А.Д. Чугун: Справочное издание. Москва: Металлургия, 1991. 576 с.
8. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. Москва: Металлургия, 1976. 288 с.
9. Бобро Ю.Г. Жаростойкие и ростоустойчивые чугуны. Москва: Машгиз, 1960. 170 с.
10. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Москва: Металлургия, 1983. 176 с.
11. Шапранов И.А., Срыбник А.Д. Высокопрочные и специальные чугуны. Москва: Машиностроение, 1983. 43 с.
12. Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна / А.В. Супов, В.П. Канев, П.Д. Одесский и др. Москва: Интермет Инжиниринг, 2007. Т.3. 920 с.
13. Терентьев А.А., Ножко С.И. О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки // Системы. Методы. Технологии. 2018. Т. 37. № 1. С. 136–141.
14. Шиманский И.А. Повышение коррозионной стойкости литых чугунных изделий в условиях высокотемпературной газовой коррозии. Автореф. канд. дис. Красноярск. 2012. 22 с.
15. Шиманский А.Ф., Биронт В.С., Бабкин В.Г., Погодаев А.М., Самойло А.С., Фризоргер В.К., Голоскин Е.С., Шиманский И.А. Влияние легирования алюминием на стойкость чугунных конструкций в условиях высокотемпературной газовой коррозии. В кн.: Сборник докладов второго международного конгресса «Цветные металлы Сибири 2010». Красноярск, 2010. С. 603–608.
16. Белякова А.И., Жукова А.А., Маццарелли Д., Белякова А.А. Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Москва: Машиностроение. 2010. 712 с.
17. Пинаев Е.А., Темлянец М.В., Протопопов Е.В. и др. Исследование влияния алюминия на коррозионную стойкость чугунов при эксплуатации в среде анодных газов электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник Российской академии естественных наук. За-

- падно-Сибирское отделение. 2021. № 24. С. 116–121.
18. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Кувшинникова Н.И. Исследование химического и фазового состава продуктов коррозии чугунных секций газосборного колокола алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2020. № 43. С. 144–151.
 19. Баранов Д.А., Лейрих И.В., Мызникова Е.С. Коррозионная стойкость деформированного высокопрочного чугуна в водных средах // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 3. С. 277–279.
 20. Баранов Д.А., Луничкина М.А., Нестерова А.И. Влияние прокатки на коррозионную стойкость высокопрочного чугуна // Защита металлов. 2003. Т. 39. № 4. С. 420–423.
- ### REFERENCES
1. Sibgatulin V.G., Shishatskii N.G. Krasnoyarsk Aluminum Plant: environmental factor. *EKO*. 2018, no. 4, pp. 48–66. (In Russ.).
 2. Shakhrai S.G. The current state of the atmosphere of aluminum production buildings and methods of its normalization. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*. 2012, no. 5, pp. 638–646. (In Russ.).
 3. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Improved efficiency of Soderberg cell shelter. *Metallurgiya tsvetnykh metallov*. 2017, no.1, pp. 19–30. (In Russ.).
 4. Yur'ev A.B., Temlyantsev M.V., Deev V.B., Feoktistov A.V., Pinaev E.A. Corrosion of cast-iron sections of the gas-collecting bell of EcoSoderberg electrolyzers. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12. pp. 883–890. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-883-890>
 5. Mintsis M.Ya., Polyakov P.V., Sirazutdinov G.A. *Aluminium electrometallurgy*. Novosibirsk: Nauka, 2001, 368 p. (In Russ.).
 6. Girshovich N.G. *Iron Casting Handbook*. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
 7. Sherman A.D. *Cast iron: Reference edition*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 576 p. (In Russ.).
 8. Bobro Yu.G. *Alloyed cast iron*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 288 p. (In Russ.).
 9. Bobro Yu.G. *Heat-resistant and growth-resistant cast iron*. Moscow: Mashgiz, 1960, 170 p. (In Russ.).
 10. Tsypin I.I. *White wear-resistant cast iron*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 176 p. (In Russ.).
 11. Shapranov I.A., Srybnik A.D. *High strength and special cast iron*. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 43 p. (In Russ.).
 12. Supov A.V., Kanev V.P., Odesskii P.D. et al. *Thermal and thermomechanical treatment of steel and cast iron*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2007, vol. 3, 920 p. (In Russ.).
 13. Terent'ev A.A., Nozhko S.I. About the quality of raw aluminum for the production of aluminum wire rod. *Sistemy Metody Tekhnologii*. 2018, vol. 37, no. 1, pp. 136–141. (In Russ.).
 14. Shimanskii I.A. Increased corrosion resistance of cast cast iron products under conditions of high-temperature gas corrosion. Autoref. cand. dis. Krasnoyarsk. 2012, 22 p. (In Russ.).
 15. Shimanskii A.F., Biront V.S., Babkin V.G., Pogodaev A.M., Samoilo A.S., Frizorger V.K., Goloskin E.S., Shimanskii I.A. *Influence of aluminum alloying on resistance of cast iron structures under conditions of high-temperature gas corrosion*. In: *Sbornik dokladov vtorogo mezhdunarodnogo kongressa Tsvetnye metally Sibiri 2010*. Krasnoyarsk, 2010, pp. 603–608. (In Russ.).
 16. Belyakova A.I., Zhukova A.A., Matstsarelli D., Belyakova A.A. *Production of castings from high-strength cast iron with spherical graphite*. Moscow: Mashinostroenie. 2010, 712 p. (In Russ.).
 17. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Protopopov E.V. etc. Study of the influence of aluminum on the corrosion resistance of cast iron during operation in the environment of anode gases of EcoSoderberg electrolyzers. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 2021, no. 24, pp. 116–121. (In Russ.).
 18. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Kuvshinnikova N.I. Study of chemical and phase composition of corrosion products of cast iron sections of the gas-collecting bell of aluminum electrolyzers EcoSoderberg. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi seksii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2020, no. 43, pp. 144–151. (In Russ.).
 19. Baranov D.A., Leirikh I.V., Myznikova E.S. Corrosion resistance of deformed high-strength cast iron in aqueous media. *Zashchita metallov*. 2004, vol. 40, no. 3, pp. 277–279. (In Russ.).
 20. Baranov D.A., Lunichkina M.A., Nesterova A.I. Impact of rolling on corrosion resistance of high-strength cast iron. *Zashchita metallov*. 2003, vol. 39, no. 4, pp. 420–423. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Александрович Пинаев, директор по электролизному производству, АО «Русал Красноярск»
E-mail: Evgeniy.Pinaev@rusal.com

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по учебной и воспитательной работе, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666

Андрей Иванович Куценко, к.т.н., начальник управления цифровой трансформации, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aik_mail@mail.ru

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

Ольга Валерьевна Бессонова, главный специалист – металловед по электронной микроскопии и исследовательским работам, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Information about authors

Evgenii A. Pinaev, Director for Electrolysis Production, JSC «Rusal Krasnoyarsk»
E-mail: Evgeniy.Pinaev@rusal.com ;

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Education-al Work, Siberian State Industrial University
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666

Andrei I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Digital Transformation Department, Siberian State Industrial University
E-mail: aik_mail@mail.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University
E-mail: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

Ol'ga V. Bessonova, Chief Specialist – Metallologist in electron microscopy and research work, JSC "EVRAZ ZSMK"

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.06.2023
После доработки 13.06.2023
Принята к публикации 15.06.2023

Received 02.06.2023
Revised 13.06.2023
Accepted 15.06.2023