

Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-81-86

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ХРОМО-КРЕМНИСТОГО ЧУГУНА В СРЕДЕ
АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**

© 2023 г. Е. А. Пинаев¹, М. В. Темлянцев², А. С. Симачев²,
Е. Н. Темлянцева², О. В. Бессонова³

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

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

³АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская Область – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Атмосфера анодных газов алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг содержит соединения фтора, оксиды серы и ванадия, вызывающие интенсивную газовую коррозию элементов газосборного колокола. Коррозия чугуновых секций газосборного колокола приводит к сокращению срока их службы. Следовательно, появляется необходимость более частых ремонтов, что является причиной снижения сортности первичного алюминия по примесям железа. Проведено исследование коррозионной стойкости низколегированного хромо-кремнистого чугуна (3,06 % Si, 0,71 % Cr) в среде анодных газов алюминиевых электролизеров. Исследования проведены в промышленных условиях. Из экспериментального чугуна выполнены полнопрофильные секции газосборного колокола. Продолжительность эксплуатации секций составила 24,32 месяца. Потери массы вследствие коррозии составили 13,5 %, средние удельные потери массы – $0,128 \cdot 10^{-3}$ г/(см²·ч). Удельные потери массы штатно используемого высокопрочного чугуна марки ВЧ с шаровидным графитом 50 почти в 4,8 раза выше и составляют $0,614 \cdot 10^{-3}$ г/(см²·ч). Основа экспериментального низколегированного хромо-кремнистого чугуна ферритная, выделения графита имеют форму близкую к сферической, коррозионные процессы развиваются по границам зерен феррита. Твердость чугуна 140 – 149 НВ. Повышенная коррозионная стойкость чугуна основана на способности хрома и кремния формировать на поверхности металла защитные пленки, препятствующие диффузии окислительных газов. Кремний способствует повышению точки образования и стабильного существования в продуктах коррозии вюститной фазы FeO до температуры 900 °С, формирует слой Fe₂SiO₄ · SiO₂, обладающий повышенными защитными свойствами, который замедляет процессы высокотемпературной газовой коррозии. Экспериментальный состав чугуна рекомендуется к промышленному применению.

Ключевые слова: низколегированный чугун, газовая коррозия, алюминиевый электролизер

Для цитирования: Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Симачев А.С., Темлянцева Е.Н., Бессонова О.В. Исследование высокотемпературной газовой коррозии низколегированного хромо-кремнистого чугуна в среде анодных газов алюминиевых электролизеров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 81 – 86. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-81-86](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-81-86)

Original article

**RESEARCH OF HIGH TEMPERATURE GAS CORROSION OF LOW-ALLOY
CHROME-SILICON CAST IRON IN AN ENVIRONMENT OF ANODIC GASES OF
ALUMINUM ELECTROLYSERS**

E. A. Pinaev¹, M. V. Temlyantsev², A. S. Simachev², E. N. Temlyantseva², O. V. Bessonova³

¹JSC «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 region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

Abstract. The atmosphere of the anode gases of the aluminum electrolyzers of EcoSoderberg contains fluorine compounds, sulfur oxides and vanadium, causing intense gas corrosion of the elements of the gas collecting bell. Corrosion of cast-iron sections of the gas collecting bell leads to a reduction in their service life, as a consequence of the need for more frequent repairs and is the reason for a decrease in the grade of primary aluminum by iron impurities. The corrosion resistance of low-alloyed chromium-siliceous cast iron (silicon content 3.06 %, chromium 0.71 %) in the anode gases of aluminum electrolyzers was studied. The research was carried out in industrial conditions. Full-profile sections of the gas collecting bell are made of experimental cast iron. The duration of operation of the sections was 24.32 months. The mass loss due to corrosion was 13.5 %, and the average specific mass loss was $0.128 \cdot 10^{-3}$, g/(cm²·h). The specific mass loss of routinely used high-strength cast iron with spherical graphite grade HF 50 is almost 4.8 times higher and amounts to $0.614 \cdot 10^{-3}$, g / (cm² · h). The basis of experimental low-alloyed chromium-silicon cast iron is ferritic, graphite secretions have a shape close to spherical, corrosion processes develop along the boundaries of ferrite grains. The hardness of cast iron is 140 – 149 NV. The increased corrosion resistance of cast iron is based on the ability of chromium and silicon to form protective films on the metal surface that prevent the diffusion of oxidizing gases. In particular, silicon contributes to an increase in the point of formation and stable existence in the corrosion products of the lustite phase of FeO up to 900 °C and forms a layer of Fe₂SiO₄ · SiO₂ with increased protective properties and slowing down the processes of high-temperature gas corrosion. The experimental composition of cast iron is recommended for industrial use.

Keywords: low-alloy cast iron, gas corrosion, aluminum electrolyzer

For citation: Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Temlyantseva E.N Bessonova O.V. Research of high temperature gas corrosion of low-alloy chrome-silicon cast iron in an environment of anodic gases of aluminum electrolyzers. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (45), pp. 81 – 86. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-81-86](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-81-86)

Технология производства первичного алюминия в электролизерах ЭкоСодерберг имеет ряд существенных преимуществ в части снижения вредных выбросов в атмосферу [1]. Однако, анодные газы алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг, содержащие соединения фтора, оксиды серы и ванадия [2], вызывают интенсивную газовую коррозию элементов газосборного колокола (ГСК) [3]. Особенно эта проблема обострилась при увеличении доли высокосернистых коксов (источников оксидов серы), применяемых в электролитическом производстве алюминия [4 – 12]. Усугубляют коррозионное воздействие высокий (до 800 °C) уровень и циклические изменения температуры анодных газов, которые приводят к изменению температуры эксплуатации чугунных элементов, в частности секций газосборного колокола (от 220 до 620 °C) [13]. Коррозия чугунных секций газосборного колокола приводит к сокращению срока их службы, как следствие к необходимости более частых ремонтов, что является причиной снижения сортности первичного алюминия по примесям железа [4 – 12]. Последнее происходит вследствие попадания

в расплав первичного алюминия продуктов коррозии чугуна, содержащих оксиды железа, осыпающихся с внутренних поверхностей секций газосборного колокола [14].

Для условий, аналогичных условиям службы секций ГСК алюминиевых электролизеров, в работе [15] рекомендуют в основном легированные чугуны, содержащие кремний, алюминий, хром. Конкретно для деталей защитного кожуха алюминиевых электролизеров предлагают использовать высокохромистый чугун марки ЧХ30.

В работах [2, 3, 16 – 19] проведены исследования процессов коррозии и коррозионной стойкости чугунов различного состава, в том числе легированных алюминием и хромом. При этом высоко- и комплекснолегированные чугуны, обладая достаточно высокой коррозионной стойкостью, повышают себестоимость чугунных секций и предъявляют высокий уровень требований к технологиям их производства, а зачастую имеют пониженные литейные свойства. При увеличении содержания алюминия более 2,5 % повышается

Химический состав исследуемого чугуна и аналогов
Chemical composition of the investigated cast iron and analogues

Марка чугуна	Содержание элемента, % (по массе)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
ЧХ1 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	1,5 – 2,5	0,4 – 1,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧХ2 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	2,0 – 3,0	1,01 – 2,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧХ3 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	2,8 – 3,8	2,01 – 3,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧС5 ГОСТ 7769 – 82	2,5 – 3,2	До 0,8	4,5 – 6,0	0,5 – 1,0	–	–	До 0,3	До 0,12
Экспериментальный	3,8	0,58	3,06	0,71	0,12	0,14	0,082	0,043

склонность расплава к пленкообразованию, это может приводить к снижению эксплуатационных свойств отливок [20]. Алюминиевые чугуны требуют одновременного проведения раздельной плавки алюминия и чугуна. Высокое содержание хрома, хотя и повышает коррозионную стойкость, но приводит к росту твердости и сложностям механической обработки высокохромистых чугунов. В связи с этим разработка составов и исследование коррозионной стойкости низколегированных и экономнолегированных чугунов в атмосфере анодных газов алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг является актуальной научно-практической задачей современного металлургии.

Проведены исследования процессов высокотемпературной газовой коррозии в атмосфере анодных газов алюминиевых электролизеров секций ГСК, выполненных из низколегированного хромо-кремнистого чугуна. Химический состав исследуемого чугуна и аналогов представлен в таблице.

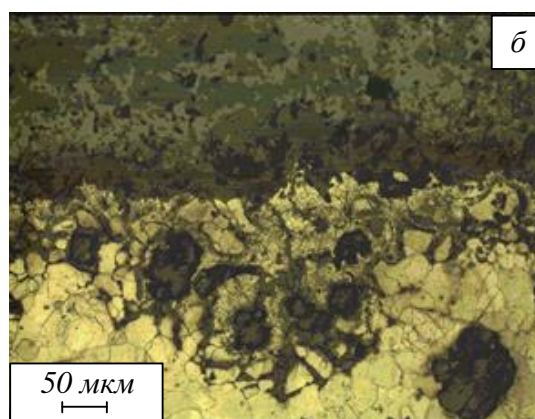
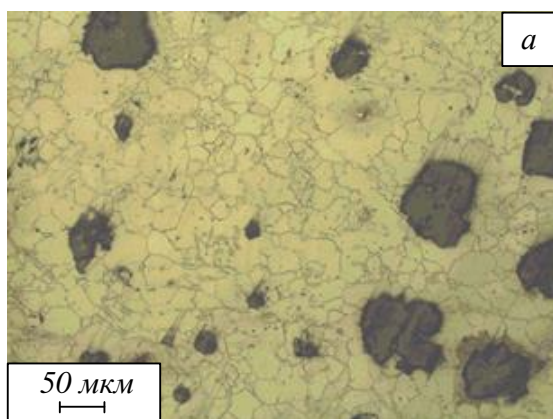
Из экспериментального чугуна получена опытная партия полнопрофильных секций ГСК. Секции смонтировали в конструкцию ГСК алюминиевого электролизера и эксплуатировали в штатном режиме. Продолжительность экспериментов составляла 24,32 мес. (742 сут.). После эксплуатации секции демонтировали, очищали на дробеструйной установке от продуктов коррозии и взвешивали. Средняя потеря массы составила 13,5 %. Визуальный осмотр показал, что коррозия по поверхности секции равномерная. После проведения взвешивания секция удовлетворяла требованиям дальнейшей эксплуатации.

Стойкость чугунов к высокотемпературной газовой коррозии определяли по удельным (U , г) потерям массы образцов с единицы поверхности ($см^2$) в единицу времени (ч). Для исследуемого низколегированного хромо-кремнистого чугуна средние удельные потери массы составили $0,128 \cdot 10^{-3}$ г/($см^2 \cdot ч$). Удельные потери массы штатно используемого высокопрочного чугуна марки ВЧ 50 с шаровидным графитом почти в 4,8 раза выше ($0,614 \cdot 10^{-3}$ г/($см^2 \cdot ч$)) [16, 17].

Для исследования микроструктуры чугуна применяли оптический металлографический микроскоп OLYMPUS GX-51. Микроструктуру выявляли травлением в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты. Твердость чугуна измеряли на твердомере ТК-2М. На рисунке представлена характерная микроструктура исследуемых чугунов после экспериментов.

Основа чугуна ферритная, выделения графита имеют форму, близкую к сферической (см. рисунок, поз. а), коррозионные процессы развиваются по границам зерен феррита (см. рисунок, поз. б). Твердость чугуна 140 – 149 НВ.

Для исследуемого низколегированного чугуна характерно повышенное содержание кремния (3,06 %) и хрома (0,71 %). Положительное влияние кремния на коррозионную стойкость в среде анодных газов отмечено в ряде работ [15, 20, 21]. Высококремнистый феррит весьма стоек к процессам окисления в высокотемпературной газовой среде. Кремний способствует повышению точки образования и стабильного существования в продуктах коррозии вюститной фазы FeO до температуры 900 °С и формирует слой $Fe_2SiO_4 \cdot SiO_2$, обладающий повышенными защитными свойствами, который замедляет процессы диффузии окислительных газов к поверхности металла. Кремний оказывает благоприятное, с точки зрения коррозионной стойкости и эксплуатационных свойств, влияние на микроструктуру чугуна. Увеличение содержания кремния приводит к ферритизации металлической основы, уменьшению размеров шаровидных включений графита [21]. При этом необходимо учитывать, что увеличение содержания кремния более 3,5 % приводит к появлению хрупкости чугуна. Окалиностойкость кремнистого чугуна (5,2 – 6,0 % Si) с шаровидным графитом превышает окалиностойкость серого чугуна низколегированного хромом, а колосники, эксплуатируемые в агломерационном производстве, выполненные из чугуна марки ЧС5Ш, имеют в два раза более высокую коррозионную стойкость, чем выполненные из чугуна ЧХ1 [21].



Микроструктура исследуемого чугуна
Microstructure of the investigated cast iron

Выводы

В результате проведенных в промышленных условиях исследований установлено, что экспериментальный низколегированный хромо-кремнистый чугун обладает высокой коррозионной стойкостью (превышающей штатно используемый высокопрочный чугун марки ВЧ 50 с шаровидным графитом почти в 4,8 раза) в атмосфере анодных газов и рекомендуется к промышленному применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development // TMS Light Metals. 2019. P. 553–563. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70
- Юрьев А.Б., Темлянец М.В., Деев В.Б., Феоктистов А.В., Пинаев Е.А. Коррозия чугуновых 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>
- Шиманский И.А. Повышение коррозионной стойкости литых чугуновых изделий в условиях высокотемпературной газовой коррозии. Автореф. канд. дис. Красноярск. 2012. 22 с.
- Терентьев А.А., Ножко С.И. О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки // Системы Методы Технологии. 2018. Т. 37. № 1. С. 136–141.
- Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Performance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659–663.
- Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Review of Coke and Anode Desulfurization // TMS Light Metals. 2007. P. 895–900.
- Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality // TMS Light Metals. 2009. P. 957–962.
- Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter. In: Essential Readings in Light Metals. 2008. P. 861–864.
- Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global trends in anode grade coke availability & quality for Australasian aluminium industry. In: Proceedings of the 7th Australasian Smelting Technology Conference, Melbourne, Australia, November 11- 15, 2001.
- Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Performance and Operational Costs-Alba's Experience // TMS Light Metals. 2010. P. 1011–1014.
- Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // TMS Light Metals. 1994. P. 659–665.
- Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // TMS Light Metals. 2009. P. 1007–1011.
- 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 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30 <http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>
- Sokolnikov V.A., Tyutrin A.A. Protection of cast iron sections of gas-collecting bell of soderberg electrolysis cell // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052. P. 238–243. <http://dx.doi.org/10.4028/p-wrd90w>

15. Шерман А.Д. Чугун. Москва: Metallurgiya, 1991. 576 с.
16. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Протопопов Е.В., Большаков Д.Г., Темлянцева Е.Н., Симачев А.С. Исследование влияния алюминия на коррозионную стойкость чугунов при эксплуатации в среде анодных газов электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. 2021. № 24. С. 116–121.
17. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Куценко А.И., Симачев А.С., 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. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)
18. Усольцев А.А., Козырев Н.А., Князев С.В., Куценко А.И., Михно А.Р. О возможности замены серых чугунов для изготовления литых элементов газосборного колокола электролизера // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 9. С. 1063–1070. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070>
19. 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.
20. Патент SU 1425242. Чугун / Счисленок Л.Л., Шитов Е.И., Фамицкая Н.В., Иванченко Т.Ф. опубл. 23.09.1988. Бюл. № 35.
21. Курганов В.А. Жаростойкий чугун с шаровидным графитом // Литейщик России. 2011. № 10. С. 25–27.
890. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-883-890>
3. Shimanskii I.A. Improving the corrosion resistance of cast iron products in conditions of high-temperature gas corrosion. Extended abstract of candidate's thesis. Krasnoyarsk. 2012, 22 p. (In Russ.).
4. 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.).
5. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Performance with Blended Coke. *TMS Light Metals*. 2005, pp. 659–663. (In Russ.).
6. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Review of Coke and Anode Desulfurization. *TMS Light Metals*. 2007, pp. 895–900. (In Russ.).
7. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality. *TMS Light Metals*. 2009, pp. 957–962.
8. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter. In: *Essential Readings in Light Metals*. 2008, pp. 861–864.
9. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global trends in anode grade coke availability & quality for Australasian aluminium industry. In: *Proceedings of the 7th Australasian Smelting Technology Conference*, Melbourne, Australia, November 11-15, 2001.
10. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Performance and Operational Costs-Alba's Experience. *TMS Light Metals*. 2010, pp. 1011–1014.
11. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption. *TMS Light Metals*. 1994, pp. 659–665.
12. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies. *TMS Light Metals*. 2009, pp. 1007–1011.
13. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Improving the efficiency of the shelter of Soderbergh electrolyzers. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2017, no. 1, pp. 19–30. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>
14. Sokolnikov V.A., Tyutrin A.A. Protection of cast iron sections of gas-collecting bell of soderberg electrolysis cell. *Materials Science Forum*. 2022, vol. 1052, pp. 238–243. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.4028/p-wrd90w>
15. Sherman A.D. Cast iron. Moscow: Metallurgiya, 1991. 576 с. (In Russ.).
16. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Protopopov E.V., Bol'shakov D.G., Temlyantseva E.N., Simachev A.S.

REFERENCES

1. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development. *TMS Light Metals*. 2019, pp. 553–563. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70
2. 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 the EcoSoderberg electrolyzers. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 883–

- Investigation 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.).
17. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Kutsenko A.I., Simachev A.S., Bessonova O.V. Investigation of the resistance of cast iron to high-temperature gas corrosion in the environment of anode gases of Ecosoderberg electrolyzers. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2023, no. 2 (44), pp. 87–94. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)
 18. Usoltsev A.A., Kozyrev N.A., Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Mikhno A.R. About the possibility of replacing gray cast iron for the manufacture of cast elements of the gas collecting bell of the electrolyzer. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2021, vol. 77, no. 9, pp. 1063–1070. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070>
 19. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Kuvshinnikova N.I. Investigation of the chemical and phase composition of corrosion products of cast iron sections of the gas collecting bell of aluminum electrolyzers EcoSoderberg. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2020, no. 43, pp. 144–151. (In Russ.).
 20. Schislenok L.L., Shitov E.I., Famitskaya N.V., Ivanchenko T.F. Cast iron. Pat. SU 1425242. *Byulleten' izobretenii*. 1988, no. 35. (In Russ.).
 21. Kurganov V.A. Heat-resistant cast iron with spherical graphite. *Liteishchik Rossii*. 2011, no. 10, pp. 25–27. (In Russ.).
- 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
- Елена Николаевна Темлянцева**, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
- Ольга Валерьевна Бессонова**, главный специалист – металлург по электронной микроскопии и исследовательским работам, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
- Information about the authors:**
Evgenii A. Pinaev, Director for Electrolysis Production, JSC «Rusal Krasnoyarsk»
E-mail: Evgeniy.Pinaev@rusal.com
- Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Academic Affairs, Siberian State Industrial University
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
- 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
- Elena N. Temlyantseva**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
- Ol'ga V. Bessonova**, Chief Specialist – Metallologist in electron microscopy and research work, JSC "EVRAZ ZSMK"

Сведения об авторах

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.09.2023

После доработки 06.09.2023

Принята к публикации 10.09.2023

Received 01.09.2023

Revised 06.09.2023

Accepted 10.09.2023