

Выпуск 43

Сборник научных
трудов

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

**ОТДЕЛЕНИЕ
МЕТАЛЛУРГИИ**



Москва
Новокузнецк
2020

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)
ББК 34.3я4
В 387

В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 43 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2020. – 272 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 89, табл. 61, библиогр. назв. 276.

Редакционная коллегия: Аренис В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., ИрНИТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., СибГИУ, г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)
ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2020

<i>Д.А. Лубяной, Р.О. Мамедов, С.В. Князев</i> Ресурсо- и энергосбережение в технологии получения стальных отливок с термовременной обработкой.....	126
<i>Т.В. Ковалева, Е.Н. Еремин</i> Повышение эксплуатационных характеристик оболочковой формы..	133
<i>А.В. Кожеевников, А.С. Смирнов, Ю.В. Платонов</i> Исследование возникновения вибраций при холодной прокатке полосы	138
<i>Е.А. Пинаев, М.В. Темлянцев, Е.Н. Темлянцева, Н.И. Кувшинникова</i> Исследование химического и фазового состава продуктов коррозии чугунных секций газосборного колокола алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг	144
<i>Н.В. Немчинова, А.А. Яковлева, А.А. Тютрин, О.П. Гудкова</i> Опробование песков прибайкалья в качестве барьерных материалов для алюминиевого электролизера	152
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	158
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, А.Е. Аникин, Т.И. Алексеева</i> Исследование механизма образования карбида циркония в условиях плазменного потока азота	159
<i>Д.К. Ёлкин, К.С. Ёлкин, А.В. Сивцов</i> Научные и технологические основы получения «активного» карбида кремния	171
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....	175
<i>А.М. Анасов</i> Явление формирования металлической связи между атомами соприкасающихся свободных поверхностей трещиноподобных дефектов при воздействии излучения оптического квантового генератора.....	176
<i>А. Х. Хакимов, Т.М. Умарова, И. Н. Ганиев, Н.Р. Эсанов</i> Анодное поведение алюминиевого-железового сплава АЖ 2,18 с иттрием, гадолинием и эрбием, в среде электролита 0,3 %-ного NaCl.....	180
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, К.А. Бутакова, А.Н. Гостевская, А.А. Усольцев</i> Изучение микроструктуры сварных соединений рельсов из стали марки Э76ХФ	187
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.Н. Гостевская, К.А. Бутакова, А.А. Усольцев</i> Влияние режимов контактной стыковой сварки на неметаллические включения в металле рельсовой стали Э76ХФ	195

Е.А. Пинаев¹, М.В. Темлянцев², Е.Н. Темлянцева², Н.И. Кувшинникова²

¹АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод», г. Красноярск, Россия

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ ЧУГУННЫХ СЕКЦИЙ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ЭКОСОДЕРБЕРГ

Статья посвящена исследованию химического и фазового состава продуктов коррозии чугунных секций элементов конструкции алюминиевых электролизеров.

The article is devoted to the study of the chemical and phase composition of corrosion products of cast-iron sections of structural elements of aluminum electrolyzers.

Одним из важных элементов конструкции алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг является газосборный колокол, секции которого выполнены из чугуна с применением литейных технологий. Внутренняя поверхность секций газосборного колокола (ГСК) подвержена агрессивному воздействию раскаленных газов, температура которых изменяется циклически и в достаточно широких пределах, при этом максимальные температуры секции ГСК могут достигать 600 – 620 °С, а минимальные 220 – 230 °С [1].

Анодные газы содержат интенсифицирующие высокотемпературную газовую коррозию чугуна фтористые соединения (HF , $\leq 300 \text{ мг/нм}^3$), элементарную серу, оксиды серы (до 240 – 270 мг/нм^3) и ванадия, смолистые вещества, основными источниками которых является криолит Na_3AlF_6 , продукты испарения электролита, анодная масса. По данным [2] в общем случае при электролизе алюминия пылегазовая смесь может содержать газообразные компоненты: HF , CF_4 , C_2F_6 , SiF_4 , SO_2 , SO_3 , H_2S , CS_2 , COS , CO_2 , CO смолистые вещества и твердые частицы: C (углеродная сажа), Al_2O_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$, K_2NaAlF_6 , AlF_3 , CaF_2 , MgF_2 .

Агрессивное воздействие раскаленных газов приводит к интенсивной коррозии секций выполненных из серого чугуна или высокопрочных чугунов с шаровидным графитом. Следствием коррозии является прогар секций и повышенная частота ремонтов электролизеров. Железосодержащие продукты коррозии попадая в расплав первичного алюминия снижают его качество и сортность. В связи с этим снижение интенсивности процессов коррозии чугунных секций ГСК актуально и имеет большое практическое значение.

В рамках данной работы проведено исследование химического и фазового состава продуктов коррозии чугуновых секций ГСК. Пробы для исследований отобраны с внутренней поверхности секций, бывших в употреблении.

Результаты спектрального анализа свидетельствуют о том, что продукты коррозии в основном состоят из оксидов железа и легирующих элементов чугуна, однако для ряда проб характерно наличие повышенного содержания Al (до 3,39 %), Na (до 5,62 %), K (до 3,08 %), S (до 3,32 %). Рентгенофазовый анализ продуктов коррозии подтвердил наличие оксидов железа Fe_3O_4 – магнетит, Fe_2O_3 – гематит и калий, натрий, алюминий, фторсодержащих соединений K_2NaAlF_6 – эльпазолит и $\text{Na}_2\text{MgAlF}_7$ – веберит. В работе [3] авторами исследован фазовый состав образцов окалина и твердых отложений на поверхности действующих в составе ГСК секций, в результате которого установлено наличие в них соединений: $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ (хиолит), Na_3AlF_6 (криолит), $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$, Fe_{1-x}S (пирротин), Fe_3O_4 (магнетит), Fe_2O_3 (гематит), Al_2O_3 (корунд) и $(\text{Al}_{1,781}\text{Fe}_{0,219})\text{O}_4$ (герцинит).

Минералогическое исследование проводилось с помощью микроскопов ЛабоСтеми-4 зум при макроскопическом изучении и ЛабоПол-2 РПО полированных аншлифов в отраженном свете.

Установлено, что пробы содержат большое количество алюмофторидов. Материал окалина имеет пористую структуру, пустоты которой в большинстве заполнены алюмофтористыми соединениями (рисунок 1).

Также они образуют каплевидные выделения (рисунок 2) по всей поверхности окалина. Окалина в некоторых местах образует скелетные кристаллы. Эти дендриты (рисунок 3) состоят, вероятно, из стекла. Также могут содержать примеси гематита.

В окалине встречается углерод в виде небольших графитовых пластинок.

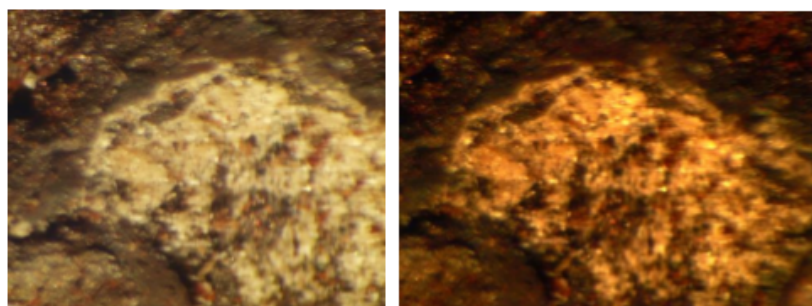


Рисунок 1 – Пористая структура окалина, пустоты которой заполнены алюмофторидами и стеклом, $\times 50$



Рисунок 2 – Каплевидные выделения алюмофторидов в основной массе окалина, $\times 35$

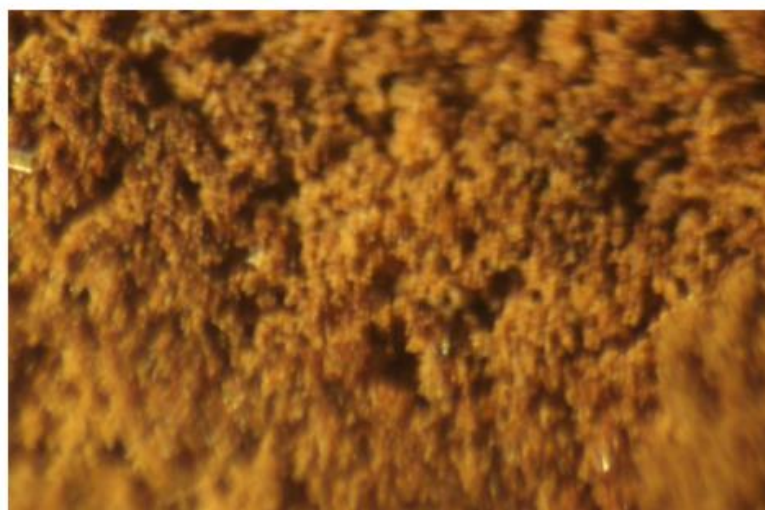
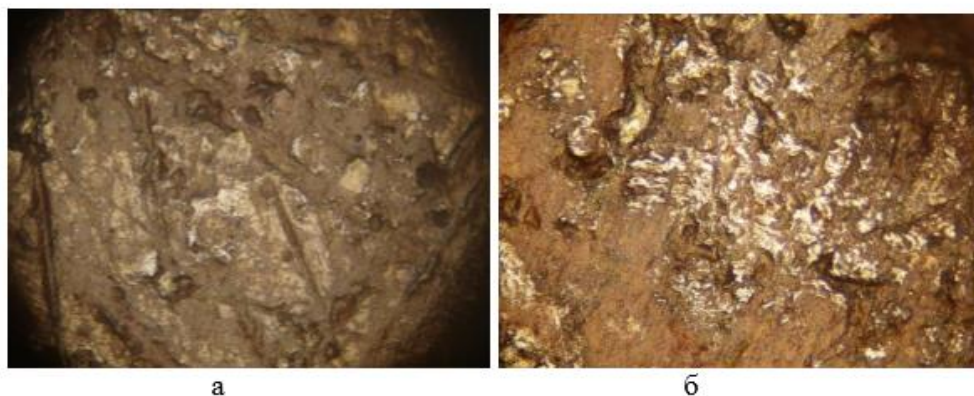


Рисунок 3 – Дендритная структура окалина, $\times 40$

Гематит (рисунок 4) образуется за счет окисления магнетита. При этом гематит и магнетит образуют решетчатую структуру прорастания (рисунки 5, 6), порождая внутрикристаллическое напряжение, за счет чего в кристаллах возникают микротрещины, заполненные алюмофторидами и стеклом (рисунки 7 – 11). Окалина имеет рыхлую структуру и пористость. По структуре образцы однородны. Основными минералами представленных проб являются гематит и магнетит.



а б
Рисунок 4 – Гематит (светло-серое) в силикатных минералах (а), в сростании с магнетитом(б) $\times 200$

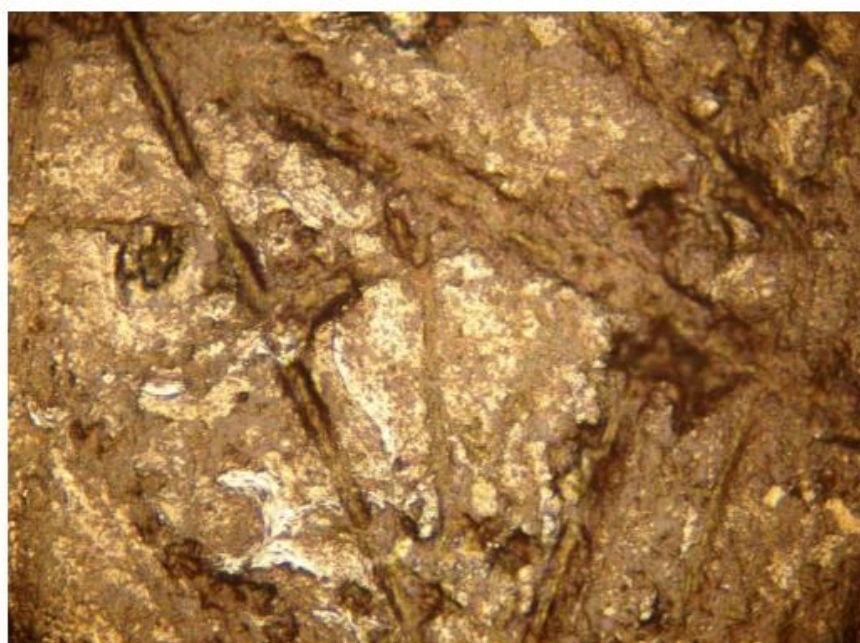


Рисунок 5 – Гематит (светло-серое) в сростании с магнетитом (белое), $\times 200$

По сравнению с окалиной чугуна и стали, образовавшейся в атмосфере воздуха или продуктов сгорания природного газа [4 – 7], окалина чугунных секций газосборного колокола фактически всех проб содержит в той или иной степени повышенное содержание углерода (до 4,3 %), фтора и серы.

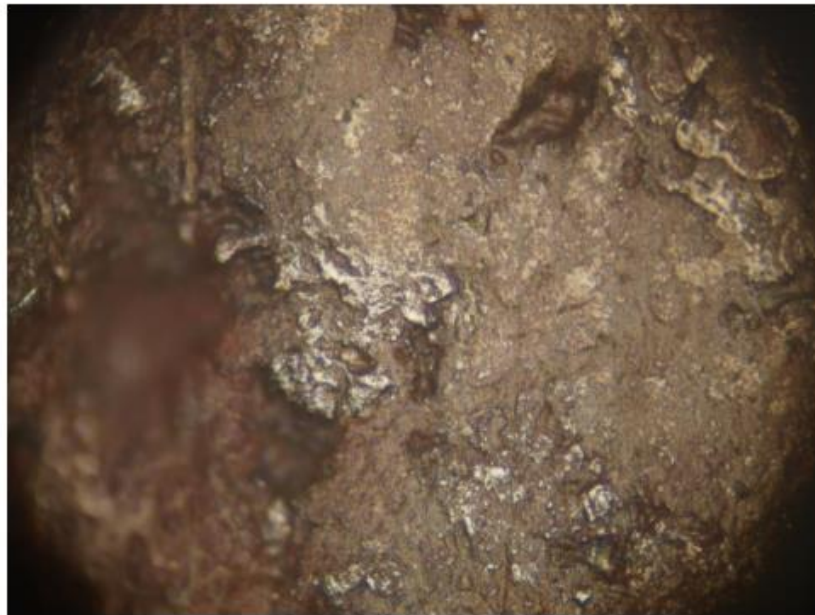


Рисунок 6 – Кристаллы магнетита в силикатах, $\times 200$

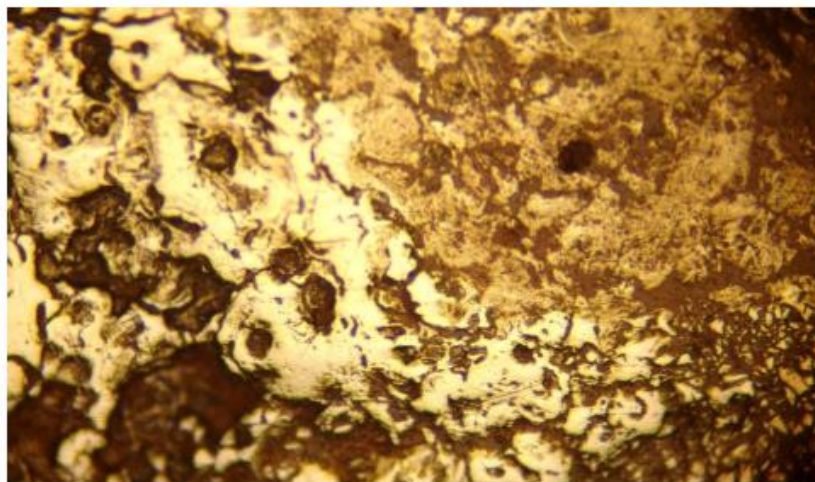


Рисунок 7 – Магнетит (светлое) в сростании с гематитом (желтое). Серое – силикаты. Гематит имеет зональное строение, $\times 200$

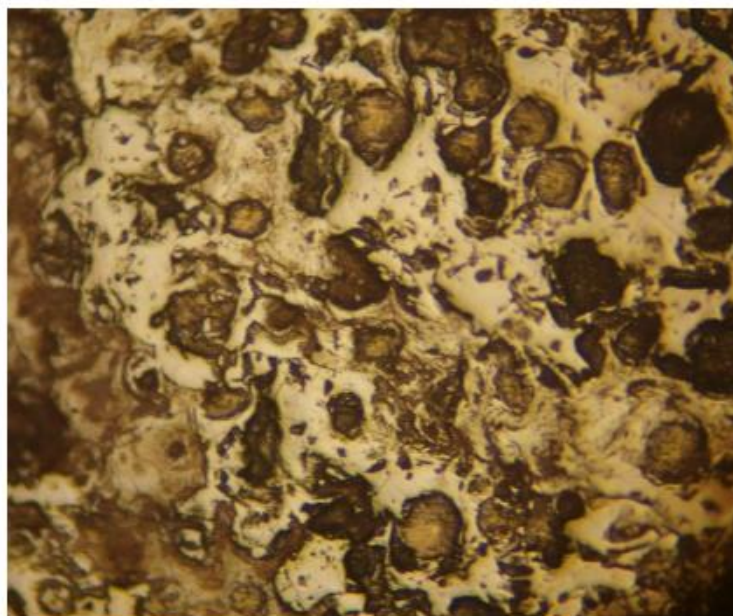


Рисунок 8 – Магнетит, $\times 100$

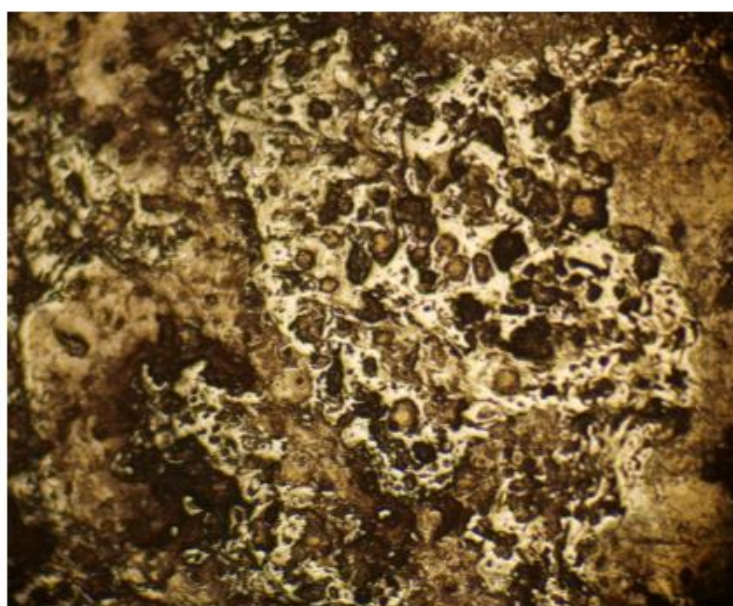


Рисунок 9 – Белое – магнетит, черное – поры, $\times 100$

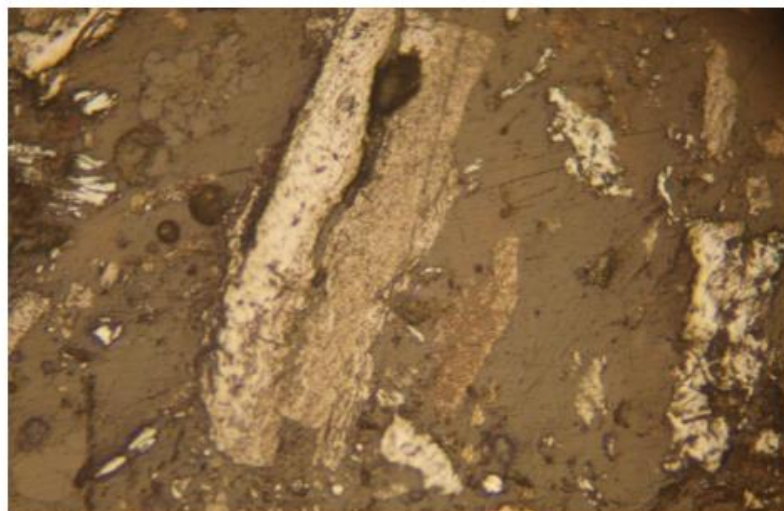


Рисунок 10 – Магнетит (светлое) в срастании с гематитом (темное). Серое – силикаты. Черное – поры, $\times 200$

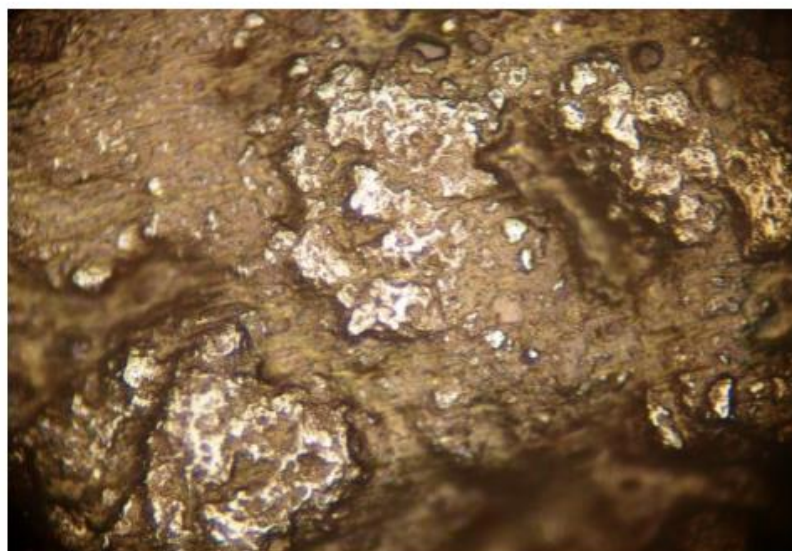
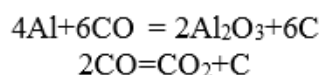


Рисунок 11 – Магнетит (светлое) в силикате, $\times 100$

Отличительной особенностью исследованных образцов окарины является высокая дефектность, рыхлость, наличие большого количества пор трещин, нарушений сплошности, низкая адгезия к окисляемой поверхности чугуна. Это является следствием содержания в окарине различных фаз и соединений, имеющих различные коэффициенты температурного расширения.

Потенциальными источниками углерода в прослойках окарины является газовая атмосфера, которая в результате реакции взаимодействия расплавленного алюминия с CO:



в качестве одного из продуктов содержит С в форме графита или сажи, образующего угольную пену [8].

Наличие в прослойках окалины углерода связано, в том числе с параллельно протекающими процессами обезуглероживания чугуна в газовой среде, содержащей окислительные и восстановительные компоненты. По данным [9, 10] вследствие обезуглероживания оксидная пленка может частично восстанавливаться, становится рыхлой и тонкой, наблюдается ее вспучивание и формирование наростов заполненных сажистым углеродом.

Выводы: в результате проведенных исследований установлен химический и фазовый состав продуктов высокотемпературной коррозии чугунных секций ГСК алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга / А.М. Виноградов, А.А. Пинаев, Д.А. Виноградов и др. // *Металлургия цветных металлов*. 2017. № 1. С. 19 – 30.
2. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. *Электрометаллургия алюминия*. – Новосибирск: Наука, 2001. – 368 с.
3. Нанесение антикоррозионных покрытий на поверхность чугунных секций газосборного колокола / А.Ф. Шиманский, В.Г. Бабкин, А.М. Погодаев и др. // *Технология металлов*. 2011. №1. С. 14 – 18.
4. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
5. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование химического состава окалины пружинной стали 60С2 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 2. С. 75 – 76.
6. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. О некоторых особенностях состава окалины, образующейся на марганцовистых сталях при высокотемпературном нагреве // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 8. С. 69, 70.
7. Темлянцев М.В. Состав окалины, образующейся на стали 45Г17Ю3 при высокотемпературном нагреве // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2006. № 1. С. 55.
8. Foosnas T., Naterstad T., Bruheim M., Grjotheim K. Anode dusting in hall - heroult cells / *Light Metals* 1986. p. 633–642.
9. Бобро Ю.Г. *Жаростойкие и ростоустойчивые чугуны*. – М.: Машгиз, 1960. – 170 с.
10. Бобро Ю.Г. *Легированные чугуны*. – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.
Отделение металлургии**

Сборник научных трудов

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 10.06.2020 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 15,8 Уч.-изд.л. 16,9 Тираж 300 экз. Заказ № 98

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ