

УДК 669.71

Разработка методики определения основных свойств огнеупорных изделий, используемых при производстве алюминия

© И.Д. Матвеевко, М.Ю. Кузьмина

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены основные огнеупорные материалы, используемые в алюминиевой промышленности. Обозначены ключевые особенности огнеупорных материалов. Показана необходимость применения новых современных огнеупорных материалов, использование которых позволит получить значительный экономический эффект при производстве алюминия. Дана характеристика нитридокремниевых и плавящихся кварцевых огнеупоров, которые используются в алюминиевой промышленности России. Проанализированы возможные методы определения основных свойств огнеупорных изделий. Выявлено несколько способов улучшения свойств огнеупорных материалов, которые применяются для литейной оснастки алюминиевого производства с целью повышения их стойкости к воздействию жидкого металла. Проведён эксперимент по определению пористости, водопоглощения и объемной массы огнеупорных изделий. Обозначено влияние пористости огнеупорных изделий на их теплопроводность, шлакоустойчивость и механическую прочность. Предложена методика определения пористости, водопоглощения, объемной массы и термостойкости огнеупоров, используемых для литейной оснастки алюминиевого производства. Отмечено, что предложенная в исследовании методика определения основных свойств огнеупорных изделий может стать альтернативой используемым в настоящее время методам, а также даст возможность не только значительно упростить, но и удешевить проведение теплотехнического эксперимента.

Ключевые слова: алюминий, литейное производство, огнеупоры в алюминиевом производстве, свойства огнеупоров, пористость, водопоглощение, объемная масса, термостойкость огнеупоров

Development of a Method for Determining the Basic Properties of Refractory Products Used in Aluminum Production

© Igor D. Matveenko, Marina Yu. Kuzmina

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article discusses the main refractory materials used in the aluminum industry. Key features of refractory materials are indicated. The article shows the need for new modern fire-resistant materials, the use of which will have a significant economic effect in the production of aluminum. It characterizes silicon nitride and fused quartz refractories, which are used in the aluminum industry of Russia. The article analyzes possible methods for determining the basic properties of refractory products, reveals several ways to improve the properties of refractory materials that are used for foundry equipment of aluminum production in order to increase their resistance to liquid metal. An experiment was conducted to determine porosity, water absorption and bulk density of refractory products. The influence of the porosity of refractory products on their thermal conductivity, slag resistance and mechanical strength is indicated. A technique is proposed for determining porosity, water absorption, and bulk mass and heat resistance of refractories used for foundry equipment of aluminum production. The article notes that the method proposed in the study for determining the basic properties of refractory products can become an alternative to the methods currently used, and will also provide an opportunity not only to significantly simplify, but also reduce the cost of the heat engineering experiment.

Keywords: aluminum, foundry, refractories in aluminum production, properties of refractories, porosity, water absorption, bulk density, heat resistance of refractories

Огнеупорами называют материалы, изготавливаемые на основе минерального сырья и отличающиеся способностью сохранять без существенных нарушений свои функциональные свойства в разнообразных условиях службы при высоких

температурах (см. М.Ю. Кузьмина¹, В.А. Кривандин^{2,3}, С.Н. Гуцин⁴,

¹ Кузьмина М.Ю. Основы металлургической теплотехники: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 162 с.

² Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства: учеб. пособие для вузов. М.: МИСИС, 2002. Т. 2. 733 с.

Г.В. Самохвалов⁵). Интенсификация всех процессов, протекающих при высоких температурах, требует повышения рабочих свойств огнеупорных изделий. Металлургическое производство потребляет основное количество огнеупоров (60–70 %) ⁶.

Огнеупорные материалы широко используются также в стекольной, цементной, атомной промышленности и в ракетостроении. Качество применяемых в промышленности огнеупоров влияет на производительность агрегатов, на качество готовой продукции и на стоимость единицы продукции [1, 2]. В металлургическом производстве при применении огнеупоров главной задачей является соответствие их свойств условиям службы при обязательном требовании, чтобы их стоимость была экономически приемлемой ⁷.

Огнеупоры в алюминиевом производстве. Среди цветных металлов по мировому производству лидирует алюминий [3–10]. Во всей металлургической отрасли производство алюминия уступает только выплавке стали. Данный металл применяют в авиационной, автомобильной и электротехнической промышленности. Его используют и во многих других отраслях, в том числе в пищевой и химической промышленности [11–14]. Китай в 2018 году произвел 55 % всего алюминия в мире. На втором месте находится Россия, выплавляющая почти 4 млн тонн алюминия [15–17].

Огнеупорные материалы в производстве алюминия используются в футеровке вращающихся печей производства глинозема (в печах кальцинации и печах спекания), электролизеров для получения металлического алюминия и электролитического рафинирования алюминия, отражательных печей плавки и усреднения металла, получения алюминиевых сплавов, руднотермических печей для получения алюминиевых сплавов (силуминов)

(см. Г.В. Галевский^{8 9 10}, Ю.В. Борисоглебский¹¹, И.С. Гринберг¹²).

Вращающаяся обжиговая печь сходна с печью для обжига цемента. Зону обжига футеруют высокоглиноземистым кирпичом, другие зоны – шамотом. Для предотвращения коррозии и перегрева металлического корпуса печи применяют двухслойную футеровку. Слои, прилегающий к корпусу, делают теплоизоляционным.

Электролитическая ванна состоит из корпуса, футерованного внутри углеродистыми блоками (катод), подовая часть которого соединена с источником тока. Металлический корпус ванны с внутренней стороны футеруют шамотными изделиями, на которые укладывают углеродистые блоки. Вакуумный ковш футеруется высокосортными шамотными или высокоглиноземистыми огнеупорами.

Плавильная печь футеруется высокоглиноземистыми огнеупорами с содержанием 80–85 % глинозема. Летки печей футеруют карбидкремниевыми и циркониевыми огнеупорами. Температура в печи сравнительно низкая, коррозионное действие шлака слабое. Однако алюминий вследствие высокой смачивающей способности легко проникает внутрь огнеупорных изделий. В связи с этим для футеровки печей требуются низкопористые материалы. Печи для выплавки высокочистого алюминия футеруют высокочистыми или чистыми муллитовыми и глиноземистыми огнеупорами.

Индукционные печи легче других очищаются от шлака, а их футеровка отличается большей долговечностью. В качестве огнеупоров применяют глиноземистые и высокоглиноземистые набивные массы с содержанием глинозема 70–80 %.

³ Кривандин В.А., Неведомская И.Н., Кобахидзе В.В. Металлургическая теплотехника: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1986. Т. 2. 592 с.

⁴ Гуцин С.Н., Телегин А.С., Лобанов В.И., Корюков В.Н. Теплотехника и теплоэнергетика металлургического производства: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1993. 366 с.

⁵ Самохвалов Г.В., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Металлургические электропечи: учеб. пособие. М.: Теплотехник, 2009. 304 с.

⁶ Там же.

⁷ Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Металлургия черных металлов и теплотехника. История развития науки и техники с древнейших времен до наших дней: учеб. пособие. М.: Теплотехник, 2008. 170 с.

⁸ Галевский Г.В., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия: справочник по технологическим и конструктивным измерениям и расчетам. М.: Теплотехник, 2013. 234 с.

⁹ Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Технология, электропитание, автоматизация: учеб. пособие для вузов. М.: Теплотехник, 2007. 529 с.

¹⁰ Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Металлургия вторичного алюминия: учеб. пособие для вузов. Новосибирск: Наука, 1998. 289 с.

¹¹ Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Новосибирск: Наука, 1999. 438 с.

¹² Гринберг И.С. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособие для вузов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 403 с.

В последнее время в алюминиевой промышленности России широко используют нитриды кремния и плавные кварцевые огнеупоры¹³. Нитриды кремния плохо смачиваются расплавом алюминия и обладают высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, они характеризуются высокой механической прочностью и малым термическим расширением, следовательно, хорошей устойчивостью к скалыванию, шелушению, трещинообразованию.

Все это благоприятствует изготовлению из них защитных трубок для термпар, литейных ковшей, леток, клапанов при непрерывной разливке, футеровки насосов по перекачиванию жидкого алюминия, плавильных печей.

Плавные кварцевые огнеупоры, отличающиеся малым термическим расширением, высокой термостойкостью, низкой теплопроводностью, используются для футеровки желобов плавильных печей, горловин, рукавов, каналов.

В настоящее время в литейном производстве большинства алюминиевых заводов для футеровки тепловых агрегатов используются, как правило, недорогие, проверенные временем, но устаревшие материалы, позволяющие обеспечить стабильную работу печи в течение 24–30 месяцев.

Для футеровки подины применяют огнеупорный шамотный кирпич марок ШБ-5, ШБ-9 производства Богдановичского ОАО «Огнеупоры». В качестве основного теплоизолятора используют диатомовый кирпич в сочетании с прослойками теплоизоляционной плиты марки МКРП-340 производства ОАО «Сухоложский огнеупорный завод» и листовой асбест. Кладку свода также производят из шамотного кирпича с теплоизолирующим слоем, выполненным из МКРП-340 толщиной 100 мм и из минеральной ваты толщиной 200–250 мм.

Также существуют огнеупоры из волластонита, они применяются для литейного производства алюминия. Назначение – литые слитки и изделий из алюминия (вставки и тепловые насадки в кристаллизатор, плиты, желоба, трубы, филь-

тры, питатели, лотки, мостики, втулки, стаканы, дюзы, дозаторы, трубы, регулирующие устройства, поплавки). Технические характеристики: отсутствие химического взаимодействия с расплавами алюминия; рабочая температура 700–800 °С; высокая термостойкость – до 50 теплосмен; низкая теплопроводность – 0,2–0,6 Вт/м·К¹⁴.

Компанией Capital Refractories Limited предложены следующие материалы, используемые в желобах для разливки алюминия:

– Capital 40 (Кэпирэл 40) – алюмосиликатный, низкоцементный огнеупорный бетон на водной связке. Материал используется в разливочных желобах с длительным сроком службы; высокопрочный;

– Capisil 90 (Кэписил 90) – низкоцементный бетон с хорошей стойкостью на основе плавного кварца, на водной связке. Содержит вещества, повышающие качество обработки алюминия, в том числе в разливочных желобах. Это огнеупорный бетон общего назначения с высокой устойчивостью к термоудару, благодаря чему его можно использовать в зонах, наиболее подверженных перепадам температур;

– Capital 85 (Кэпирэл 85) – низкоцементный огнеупорный бетон на основе боксита, на водной связке с длительным сроком службы. Материал содержит вещества, повышающие эффективность обработки расплавленного алюминия. Это высокопрочный огнеупорный бетон общего назначения, применение которого наиболее эффективно для ковшей и разливочных желобов;

– Capilight 70 (Кэпилайт 70) – низкоцементный огнеупорный бетон на основе плавного кварца, на водной связке. Это теплоизоляционный огнеупорный бетон общего назначения, особенно подходящий для литых разливочных желобов.

В настоящее время конструктивные изменения тепловых агрегатов не дают эффективного снижения себестоимости продукции за счет снижения энергопотребления из-за применения прежних огнеупорных материалов.

Таким образом, в данный момент в алюминиевой промышленности стоит вопрос о возможности использования новых

¹³ Темлянец М.В., Темлянцева Е.Н. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства: учеб. пособие для вузов. М.: Теплотехник, 2008. 192 с.

¹⁴ Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Металлургия вторичного алюминия: учеб. пособие для вузов. Новосибирск: Наука, 1998. 289 с.

современных огнеупорных материалов, применение которых позволит получить значительный экономический эффект при производстве алюминия.

Определение пористости, водопоглощения, объемной массы и термостойкости огнеупоров. Существует несколько путей улучшения свойств огнеупорных материалов, используемых для литейной оснастки алюминиевого производства, с целью повышения их стойкости к воздействию жидкого металла¹⁵:

- снижение содержания химических компонентов огнеупорной футеровки, которые имеют сродство к кислороду ниже, чем алюминий;
- оптимизация пористости огнеупорной футеровки;
- снижение смачиваемости поверхности огнеупорной футеровки жидким алюминием.

В данной работе исследовались основные свойства огнеупорных изделий, рекомендуемых для использования при производстве алюминия на предприятиях компании «РУСАЛ».

Для испытаний использовались стандартные образцы огнеупоров, применяемых в литейных отделениях алюминиевых заводов, а также образцы, в состав которых введены определенные добавки, способствующие уменьшению пористости огнеупорных изделий. Согласно ГОСТ 2409-2014¹⁶, образцы, взятые для испытания, должны иметь форму цилиндра общим объемом от 50 до 250 см³. При испытании нескольких изделий число образцов, взятых от каждого изделия, должно быть одинаковым.

В работе использовались цилиндрические образцы объемом 85–95 см³, вид которых представлен на рисунках 1 и 2 [18].

В работе исследовались следующие свойства огнеупоров:

- пористость;
- водопоглощение;
- объемная масса;
- термостойкость.

Термостойкость – это способность огнеупоров выдерживать без разрушения резкие колебания температуры^{1–4}. Термостойкость характеризуется числом теплосмен, то есть циклов нагрева и охлаждения. Различают *водяные* и *воздушные теплосмены*.

В работе при изучении *водяных теплосмен* образец нагревался до 1300 °С в муфельной печи, выдерживался 10 мин при этой температуре, а затем охлаждался в проточной воде (5–25 °С) в течение 5 мин. Эти циклы (теплосмены) продолжались до тех пор, пока образец не *терял 20 % первоначальной массы*. Большое влияние на термостойкость оказывал химико-минералогический состав и зерновой состав огнеупора [18].

Полученная термостойкость T_{C1300} – вода огнеупоров составляла: динасовых – 1–2; шамотных – 10–25; высокоглиноземистых – 15–20; периклазовых – 1–2; периклазохромитовых – 5–20, что соответствует литературным данным^{1–3}.

При исследовании *воздушных теплосмен* огнеупорный кирпич нагревался до 800 °С и охлаждался на воздухе до потери 20 % массы¹. Полученные в ходе экспериментов результаты также соответствовали данным, приведенным в литературе^{1–3}.

Кажущаяся пористость. Размеры пор, их структура и количество в огнеупорных изделиях весьма разнообразны. Различают три вида пористости^{1–4}:

– *истинная (общая) пористость* – это отношение в процентах объема всех пор в изделиях к общему объему изделия;

– *кажущаяся (открытая) пористость* – отношение в процентах объема пор в изделии, сообщающихся между собой и с атмосферой, к общему объему изделий;

– *закрытая пористость* – отношение в процентах объема пор, не связанных с поверхностью изделия, к общему объему изделия.

Непосредственное определение пористости огнеупоров довольно сложно, поэтому кажущаяся пористость огнеупорных материалов обычно вычисляется исходя из величины водопоглощения.

Водопоглощением называется выраженное в процентах отношение массы поглощенной образцом воды после его кипячения к массе сухого образца.

Объемной массой (кажущейся плотностью) изделия называется масса

¹⁵ Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Технология, электрооборудование, автоматизация: учеб. пособие для вузов. М.: Теплотехник, 2007. 529 с.

¹⁶ ГОСТ 2409-2014. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Введ. 01.09.2015. М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

изделия, отнесенная к её объёму вместе с порами.



Рис. 1. Стандартные огнеупорные изделия, используемые при определении пористости, водопоглощения, объемной массы и термостойкости



Рис. 2. Огнеупорные изделия, в состав которых введены определенные добавки

Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения представлен в ГОСТ 2409-2014¹⁶. Нами была предложена методика определения данных свойств, дающая аналогичные результаты и позволяющая существенно упростить проведение эксперимента.

Перед экспериментом по определению пористости, водопоглощения и объемной массы огнеупорных изделий образцы сушились при температуре 130 °С в сушильном шкафу до постоянной массы. Масса считалась постоянной, если результат последующего взвешивания, проведенного не менее чем через 1 ч сушки, отличался от предыдущего не более чем на

0,1 %. Перед каждым взвешиванием образцы охлаждались в эксикаторе до комнатной температуры.

Предложенный метод определения пористости, водопоглощения и объемной массы основан на взвешивании образца. Результаты взвешивания образца объемом 50 см³ и более записывались в граммах с точностью до первого десятичного знака¹⁶. Объем огнеупора определялся по объему вытесненной жидкости с точностью 0,1 см³.

Исследуемые образцы помещались в термостойкий стакан и постепенно заливались дистиллированной водой. Полностью залитые водой образцы кипятились в течение 3 ч. Во время кипячения поверх-

ность образцов должна быть полностью покрыта водой. По окончании кипячения образцы охлаждались под проточной водой в течение 10 мин.

Насыщенные водой образцы извлекались из стакана. С поверхности образцов удалялась избыточная влага с помощью влажной губки или хлопчатобумажной ткани. Непосредственно после удаления влаги образцы, насыщенные водой, взвешивались с точностью до первого знака после запятой.

На основании результатов взвешиваний вычислялись кажущаяся (открытая) пористость, водопоглощение и объемная масса огнеупорных изделий.

Вычисление *открытой пористости* (%) производилось по формуле:

$$P_0 = 100 \cdot (G_2 - G_1) / V,$$

где G_1 – масса сухого образца, кг; G_2 – масса образца, насыщенного водой, кг; V – объем образца, м³.

Водопоглощение (В, %) определялось как отношение массы поглощенной образцом воды к массе сухого образца:

$$B = 100 \cdot (G_2 - G_1) / G_1.$$

Отношение открытой пористости к водопоглощению соответствует *кажущейся плотности* (или *объемной массе* огнеупорных изделий), кг/м³:

$$\rho_{\text{каж}} = P_0 / B = G_1 / V.$$

По результатам проведенных расчетов определялось среднеарифметиче-

ское значение изучаемых свойств для каждого исследуемого огнеупорного изделия.

При определении истинной пористости $P_{\text{и}}$ необходимо было знать плотность материала ρ (масса единицы объема материала в плотном состоянии – без пор).

Отношение кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$ к истинной плотности характеризует степень плотности изделия. Если определить степень плотности изделия, можно найти *истинную пористость*, %:

$$P_{\text{и}} = (1 - \rho_{\text{каж}} / \rho) \cdot 100.$$

Закрытая пористость определялась как разность истинной и открытой пористости:

$$P_3 = P_{\text{и}} - P_0.$$

Пористость огнеупорных изделий влияет на их теплопроводность, шлакоустойчивость и механическую прочность. Сквозная пористость оказывает большое влияние на газопроницаемость изделий.

Таким образом, представленная в работе методика определения основных свойств огнеупорных изделий может служить альтернативой тем методам, которые используются в настоящее время для определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения, также данная методика позволит существенно упростить и удешевить проведение теплотехнического эксперимента.

Библиографический список

1. Сизов В.И., Тонков В.Н., Копейкина Л.Я. Корундовые массы для футеровки печей чугуноплавильного производства // Огнеупоры и техническая керамика. 2001. № 9. С. 51–53.

2. Сизов В.И., Тонков В.Н., Карпец Л.А., Пихутин И.А. Массы для футеровки агрегатов производства и переработки алюминия и сплавов на его основе // Новые огнеупоры. 2002. № 1. С. 36–40. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rein-refractory.ru/nashi_publicacii/31/ (30.01.2020).

3. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бараскас А.А. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // Цветные металлы. 2019. № 12 (924). С. 22–29.

4. Кузьмин М.П., Ларионов Л.М., Кузьмина М.Ю., Кузьмина А.С. Получение заэвтектических силуминов с использованием аморф-

ного диоксида кремния // Цветные металлы. 2019. № 12 (924). С. 29–36.

5. Kuz'min M.P., Kondrat'ev V.V., Larionov L.M., Kuz'mina M.Y., Ivanchik N.N. Possibility of preparing alloys of the Al–Si system using amorphous microsilica // Metallurgist. 2017. Vol. 61. P. 86–91.

6. Kuz'min M.P., Paul K. Chu, Abdul M. Qasim, Larionov L.M., Kuz'mina M.Yu., Kuz'min P.B. Obtaining of Al–Si foundry alloys using amorphous microsilica – Crystalline silicon production waste // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 806. P. 806–813.

7. Kuz'min M.P., Larionov L.M., Paul K. Chu, Abdul M. Qasim, Kuz'mina M.Yu., Kondratiev V.V., et al. New methods of obtaining Al–Si alloys using amorphous microsilica // International Journal of Metallurgy. 2020. Vol. 14. № 1. P. 207–217. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cityu.edu.hk/phy/appkchu/Publications/2020/20.23.pdf> (30.01.2020).

8. Кузьмин М.П., Кондратьев В.В. Разработка способа получения силуминов с использованием микро- и наночастиц диоксида кремния // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докладов VIII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.). Красноярск, 2016. С. 170–171.

9. Кузьмин М.П., Иванов Н.А., Кондратьев В.В., Григорьев В.Г., Кузьмина М.Ю., Бегунов А.И. [и др.]. Получение композиционного материала «алюминий – углеродные нанотрубки» методом горячего прессования // Металлург. 2017. № 9. С. 97–102.

10. Радионов Е.Ю., Третьяков Я.А., Немчинова Н.В. Влияние положения анодной рамы на магнитогидродинамические параметры электролизера С-8БМЭ // Технология металлов. 2018. № 4. С. 31–39.

11. Демидов М.А., Кузьмина М.Ю. Получение и возможности использования в промышленности анодных оксидных покрытий на поверхности изделий из алюминия и его сплавов // Научный диалог: молодой учёный: сб. науч. трудов по материалам XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 22 октября 2019 г.). СПб.: Изд-во ЦНК МОАН, 2019. С. 8–11.

12. Тюшкевич А.О., Кузьмина М.Ю. Применение алюминия и алюминиевых сплавов в пищевой промышленности // Актуальные проблемы химии, биотехнологии и сферы услуг: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 115–120.

13. Ситникова В.Г., Кузьмина М.Ю. Возможности химического оксидирования алюминия // Перспективы развития технологии

переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, апрель 2019 г.). Иркутск, 2019. С. 33–35.

14. Кузьмина М.Ю., Белик О.Д. Применение титана и алюминия в технологических аппаратах пищевой промышленности // Актуальные проблемы химии, биотехнологии и сферы услуг: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, апрель 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 108–113.

15. Кузьмин М.П., Шестаков С.С., Кузьмина М.Ю., Журавлёва А.С. Инновационное развитие металлургического комплекса Иркутской области // Вестник ИРГТУ. 2015. № 5 (100). С. 236–240.

16. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37.

17. Книжник А.В., Григорьев В.Г., Тепинкин С.В., Пьянкин А.П., Кузаков А.А., Высотский Д.В. [и др.]. Оптимизация некоторых элементов технологии производства алюминия при помощи математических методов // Цветные металлы и минералы – 2018: сб. докладов X Междунар. конгресса (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.). Красноярск, 2018. С. 541–549.

18. Матвеев И.Д., Кузьмина М.Ю. Исследование свойств огнеупорных материалов, используемых для литейной оснастки алюминиевого производства // Переработка природного и техногенного сырья: сб. науч. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 45–50.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Матвеев Игорь Дмитриевич,
студент группы МЦБ–16–1,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: Matveenko2011@yandex.ru
Igor D. Matveenko,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Fed-
eration,
e-mail: Matveenko2011@yandex.ru

Кузьмина Марина Юрьевна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры металлургии цветных метал-
лов,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: Kuzmina.my@yandex.ru
Marina Yu. Kuzmina,
Cand. Sci. (Chemistry),
Associate Professor, Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Fed-
eration,
e-mail: Kuzmina.my@yandex.ru