

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385

УДК 533.9+ 53.043+ 66.088

Разработка новой плазменной технологии получения чистого белого корунда

Виктория Эдуардовна Кисон¹, Александр Сеит-Умерович Мустафаев²,
 Владимир Сергеевич Сухомлинов³

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ kison.vika@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9584-8474>

² alexmustafaev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

³ v_sukhomlinov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9986-4209>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты разработки и первичной апробации плазменного способа получения чистого белого корунда. Совершенствование способов производства чистого корунда — важная задача промышленности в рамках снижения энергопотребления и загрязнения окружающей среды. Целью исследования является выбор сырья, первичная оценка параметров технологии, проведение эксперимента по плавлению, оценка полученного образца. **Метод.** Плавление корунда проводится в реакторе при помощи высоковольтного плазматрона. В качестве рабочего газа используется смесь аргона и 25–30 % азота. Предложено использование четырехслойной защиты реактора плавления для обеспечения одновременно термоизоляционных свойств и прочностных характеристик. Это особенно актуально в условиях перепада температур порядка 2000 К и устранения явления дефектной кристаллизации расплава от стенок реактора. **Основные результаты.** В результате эксперимента по плавлению глинозема марки Г-00 с использованием высоковольтного плазматрона, работающего на воздухе, получен образец с содержанием оксида алюминия 99,79 % и абсолютной твердостью 500. **Практическая значимость.** Дальнейшие эксперименты позволят определить возможность применения предложенной технологии для получения образцов с увеличенным содержанием оксида алюминия. Рассматривается вопрос применения данной технологии для промышленного получения монокристаллов чистого корунда. Технология позволит получать образцы для использования в качестве абразивов, для оптических систем, получения сапфировых стекол и скальпелей.

Ключевые слова

плазменные технологии, белый корунд, плазматрон, соединения алюминия

Ссылка для цитирования: Кисон В.Э., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С. Разработка новой плазменной технологии получения чистого белого корунда // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 380–385. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385

Development of a new plasma technology for producing pure white corundum

Viktoriia E. Kison¹, Alexander S. Mustafaev², Vladimir S. Sukhomlinov³

^{1,2} Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ kison.vika@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9584-8474>

² alexmustafaev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

³ v_sukhomlinov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9986-4209>

Abstract

The paper presents the results of mining and primary approbation of plasma method for producing pure white corundum. Upgrading ways of pure corundum production is an important task for industry as part of reducing the energy consumption and environmental contamination. The purposes of the research at this stage are as follows: the selection of raw materials, formative evaluation for characteristics of the technology, conducting an experiment on melting and assessment of the sample. The corundum melting is conducted in the reactor using high-voltage plasmatron. Mixture of

© Кисон В.Э., Мустафаев А.С.-У., Сухомлинов В.С., 2021

argon and 25–30 percent of nitrogen is used as the working fluid. The authors suggest using a four-layered protection of a melting reactor in order to ensure both thermal insulation properties and strength characteristics. This is especially relevant under temperature difference of the order of 2000 K and elimination of defective crystallization of the melt from the walls of the reactor. As a result of an experiment on melting alumina marked G-00 using high-voltage air powered plasmatron, the sample with alumina oxide in the amount of 99.79 percent and with absolute hardness equal to 500 was obtained. Further experiments make it possible to determine the prospects of using the proposed technology to obtain samples with an increased content of aluminum oxide. The paper discusses the application of the described technology for industrial production of pure corundum single crystals. The technology will make it possible to obtain samples to be used as abrasives for optical systems and for the production of sapphire glasses and scalpels.

Keywords

plasma nanotechnologies, white corundum, plasmatron, aluminum compounds

For citation: Kison V.E., Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S. Development of a new plasma technology for producing pure white corundum. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 380–385 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385

Введение

Плазменная технология получения сверхчистого белого корунда и алюминия способом плавления глинозема плазменной струей в реакторе, а также атомно-эмиссионная спектроскопия твердых образцов (в том числе сталей и сплавов) относятся к новым, расположенным на стыке научных направлений проблемам. Данная задача была поставлена перед научной школой физики плазмы Горного университета [1].

Решение подобного рода задач крайне актуально для развития промышленного производства. В современной промышленности корунд получают в основном методом электродуговой плавки [2], что приводит к слишком сильному загрязнению расплава материалами электродов, неоднородности расплава, возникновению кристаллизации внутри расплава от примесных центров [3]. Для производства сверхчистого белого корунда требуемая чистота выходного продукта (99,999 %) достигается путем предотвращения попадания загрязнения в расплав на всех этапах технологической цепочки, что делает крайне важными: выбор плазмообразующего газа, определение конструкции реактора, определение ресурса плазмотрона, выбор исходного сырья, выбор температурных режимов и режимов работы плазмотрона. Существующие химические методы производства корунда — алкогелятный¹, синтез корунда из алюминия в реакторе высокого давления [4], термическое разложение нитратов алюминия [5–7] являются слишком дорогостоящими, длительными и трудозатратными, и поэтому не получили широкого промышленного применения [8].

Внедрение новых технических и технологических решений в области плазменной металлургии дает возможность для разработки установки нового типа, такой как плазменно-дуговой вакуумный электролизер, что позволяет снизить себестоимость на 25 % за счет использования только глинозема без присутствия электролита с добавками.

¹ Коробко А.Н., Заболотько А.Л., Майоров А.В., Чертилин В.В. Инновационная технология производства оксида алюминия чистотой 99,999%, Презентация проекта «Прима 107» Саров, 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/28410827-Innovacionnaya-tehnologiya-proizvodstva-okside-alyuminiya-chistotoy-99-999.html> (дата обращения: 11.05.2021).

Постановка задачи

Современные используемые технологии электродуговой плавки уже не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к сырью и процессу производства (с точки зрения экологии, снижения энергопотребления и наращивания объемов производства). Использование высокотемпературных процессов, происходящих в плазме, может решить эти задачи. На данном этапе разработки поставлена цель выбора параметров такой технологии и ее первичная апробация.

В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

- определение параметров материалов и конструкции тепловой защиты резервуара для получения расплава глинозема и выбор оптимальных материалов для этой защиты;
- оценка характеристик плазмотрона (суммарная мощность, рабочий газ) для получения расплава глинозема в количестве, достаточном для производства 20 кг/ч алюминия;
- проведение предварительных исследований возможных направлений дальнейшей оптимизации результатов.

Материалы футеровки и рабочих сред. При расчете футеровки реактора осуществлялась оценка тепловых потоков в элементы цепи при помощи закона Фурье. Тепловой поток через несколько слоев, каждый из которых имеет некоторое тепловое сопротивление

$$R = \frac{dx}{\lambda}, \text{ описывается формулой}$$

$$\frac{P}{A} = \frac{dT}{R},$$

где $R = \sum_{i=1}^n R_i$, $R_i = \frac{dx_i}{\lambda_i}$; P — мощность теплового потока; A — площадь слоя; dT — перепад температуры на слое; R — тепловое сопротивление слоя; dx — толщина слоя; λ — средняя теплопроводность слоя.

Поскольку перепад температур в теплозащите должен составлять порядка 2000 К (температура расплава глинозема около 2300 К), и при этом необходимо обеспечить механическую прочность конструкции реактора, предлагается использовать многослойную защиту.

Для уменьшения тепловых потерь из расплава, первый слой футеровки выполняется, как правило [9], из теплоизоляционного материала. При перепаде температур в 2000 К использование однослойной защиты невозможно, так как такой перепад температур могут обеспечить только пористые материалы, прочность которых не соответствует заявленной конструкции, а материалы с большей прочностью не обеспечивают необходимое падение температуры. Двухслойная тепловая защита не может быть использована, по причине того, что на первом слое перепад температуры достаточно мал, т. е. основная термическая нагрузка придется на второй слой, что приведет к термической усталости материала. Увеличение слоев теплозащиты больше четырех приведет к усложнению конструкции, поэтому авторами была выбрана именно четырехслойная защита, в которой первый слой выполняет теплоизоляционную функцию, второй и третий — прочные материалы, но с низкой теплопроводностью, четвертый — материал, к которому не предъявляются прочностные требования, однако он будет принимать на себя основную термическую нагрузку [10].

С целью получения кристаллов корунда с максимальными размерами внутренний слой футеровки должен: не вступать в химическую реакцию с расплавом, иметь температуру плавления выше, чем у расплава, максимально отличаться от корунда по структуре кристаллической решетки. Так как в этом случае кристаллизация расплава может пойти от стенок реактора, образуя трещины и неоднородности. Всем этим требованиям удовлетворяет листовой молибден [11].

Примеры материалов, которые могут быть использованы для создания теплозащиты: для первого слоя — графит, покрытый листовым молибденом, для второго — периклазовый огнеупор, $MgO > 85\%$, для третьего — цирконовый огнеупор, $ZrO_2 > 50\%$, $SiO_2 > 25\%$, для четвертого — высокопористая керамика OXIDAL 1650, OXIDAL 1750.

Выбор плазмообразующего газа. Для оптимального выбора рабочего газа плазмотрона необходимо сформулировать критерии, по которым будет сделан отбор и выбрана методика обработки каждого критерия [12].

Высокая эффективность энергетического обмена между струей газа и нагреваемой поверхностью оценивалась при помощи числа Нуссельта. Выполнен расчет пространственных распределений газовых параметров при прохождении струи через отверстие в покоящийся собственный газ [13] для рассматриваемых условий (турбулентный режим течения, вынужденный тип конвективного переноса тепла). Критерию максимальной теплопередачи удовлетворяет азот.

Низкая скорость эрозии первого слоя футеровки стенок резервуара в результате взаимодействия с рабочим газом плазмотрона обеспечивается за счет использования химически инертного газа, например аргона. Однако он менее эффективен с точки зрения передачи тепла от струи плазмотрона к нагреваемой поверхности. При использовании в качестве покрытия первого графитового слоя листового молибдена и аргона не будет происходить реакции образования цианов между азотом и графитом.

Важным критерием также является ресурс работы самого плазмотрона, который определяется в основном эрозией его электродов. Согласно работе [14], при использовании смеси аргона с азотом, содержащей 25–30 % азота, происходит явление азотирования поверхности электродов, что ведет к улучшению их эрозионных свойств.

Таким образом, учитывая проведенный подбор газа по критериям [12], выбор сделан в пользу смеси азота и аргона с содержанием азота 25–30 %.

Параметры плазмотрона. Эрозия электродов влияет не только на ресурс плазмотрона, но также и на характеристики получаемого материала. При работе плазмотрона возникает явление эрозии катода и анода, причем материал анода поступает в расплав в большем количестве, ввиду того что анодное падение потенциала превосходит по величине катодное, вызывая более сильный нагрев анода [15, 16]. Скорость эрозии электродов при этом может меняться в пределах от 10^{-12} до 10^{-5} кг/Кл [17–19].

Оценим, какова допустимая удельная скорость эрозии электродов плазмотрона. Будем считать, что в результате эрозии весь материал электродов поступает в расплав оксида алюминия (Al_2O_3).

Пусть допустимая относительная концентрация примесей в расплаве равна δ_i . Как показывают расчеты, для расплавления 1 кг/ч глинозема необходимо 1 кВт·ч энергии. Таким образом, при мощности плазмотрона W_p , кВт, за час будет произведено $W_p \eta_p$, кг, расплава Al_2O_3 , где η_p — коэффициент полезного действия плазмотрона. Предположим, что I — ток, плазмотрона, а относительное содержание примесей в сухом глиноземе (δ_a) меньше допустимой относительной концентрации примесей в расплаве (δ_i), т. е. $\delta_a < \delta_i$.

Нетрудно видеть, что предельно допустимая удельная скорость эрозии электродов плазмотрона Δ_p , кг/Кл, связана с введенными выше величинами следующим образом:

$$\Delta_p = \frac{(\delta_i - \delta_a) W_p \eta_p}{3600 I} \approx 2,8 \cdot 10^{-4} (\delta_i - \delta_a) \eta_p U,$$

где U — рабочее напряжение плазмотрона.

Отсюда следует, что предельно допустимая скорость эрозии электродов плазмотрона не зависит от его тока [20]. Таким образом, использование трехфазного плазмотрона переменного тока с напряжением 1–2 кВ оказывается оптимальным по этому параметру.

От интегральной эрозии электродов зависит не только загрязнение расплава глинозема, но и ресурс непрерывной работы плазмотрона. Износ электродов приводит к отклонению режима плазмотрона от оптимального и, в итоге, к прекращению генерации дугового разряда. Эксперименты, проведенные авторами [17, 18] показали, что ресурс плазмотронов повышенного напряжения (порядка 1–2 кВ) при использовании в качестве рабочего газа азота и электродов из псевдосплава вольфрама и меди (81,9 % W + 10,9 % Cu) выше на порядок величины по сравнению с плазмотронами, рабочее напряжение которых 200–500 В, и составляет 1000 ч и выше.

Результаты апробации предложенной технологии

Предварительный эксперимент по плавлению проводился в полусферическом тигле радиусом 250 мм (рис. 1), покрытом внутри молибденом, в качестве исходного сырья использовался глинозем марки Г-00 (99,02 % Al_2O_3). Для эксперимента выбран высоковольтный трехфазный плазмотрон мощностью 50 кВт ИЭЭ РАН [21], работающий на воздухе. Остывание образца происходило самостоятельно, без поддерживающего плазмотрона.

В результате предварительного эксперимента удалось получить образец корунда чистотой 99,79 % на основе кристаллохимического анализа с использованием рентгеновского дифрактометра Huber G670 и абсолютной твердостью 500, определенной склерометром RGK SK-60. Принцип работы склерометра основан на

изменении высоты отскока бойка в условных единицах шкалы прибора от контролируемой поверхности объекта, что является косвенной характеристикой прочности на сжатие.

На рис. 2 приведена дифрактограмма линий образца корунда и Al_2O_3 .

Состав и структура полученного вещества исследовались с помощью камеры Гинье высокого разрешения Image Plate Huber G670. Полученные по дифрактограммам спектральные линии сравнивались с эталонными значениями. В результате обработки дифрактограмм с использованием встроенного специализированного программного продукта прибора получен отчет о структурном и химическом составе образца. По результатам отчета исследуемый образец имеет следующий химический состав: 99,79 % Al_2O_3 ; 0,02 % SiO_2 ; 0,01 % Fe_2O_3 ; 0,04 % TiO_2 ; 0,09 % MoO_3 ; 0,22 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (в пересчете на Na_2O).

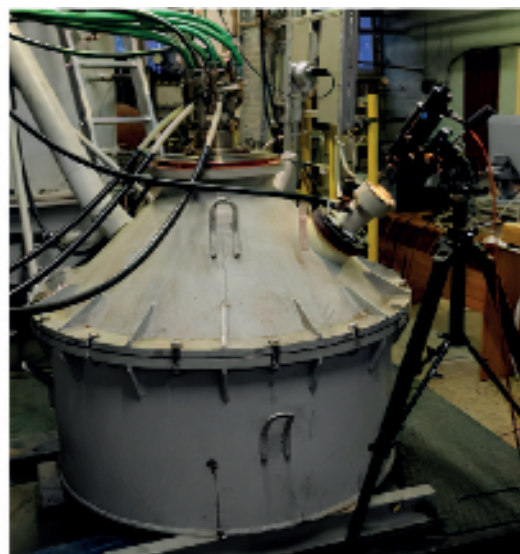
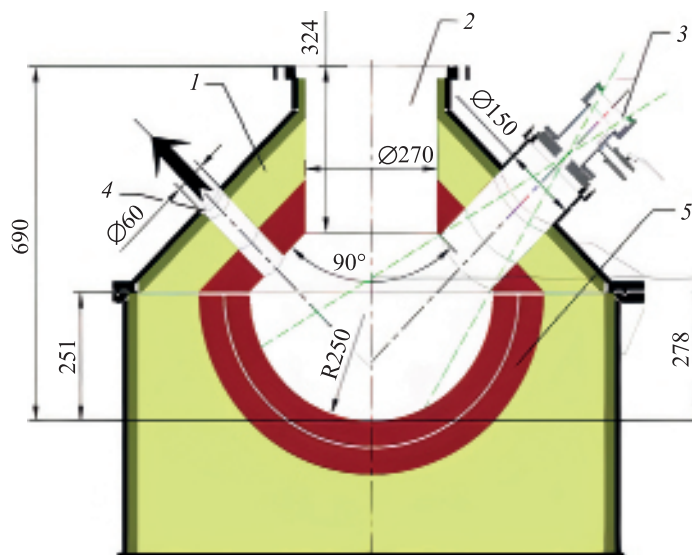


Рис. 1. Проект и фотография сборки опытно-промышленной установки плавления глинозема: 1 — коническая крышка; 2 — вертикальный канал; 3 — наклонный технический канал; 4 — газозод; 5 — комплексная футеровка печи

Fig. 1. Design and photograph of the installation of an experimental alumina melting plant: 1 — conical cover; 2 — vertical channel; 3 — inclined technical channel; 4 — gas conduit; 5 — complex furnace lining

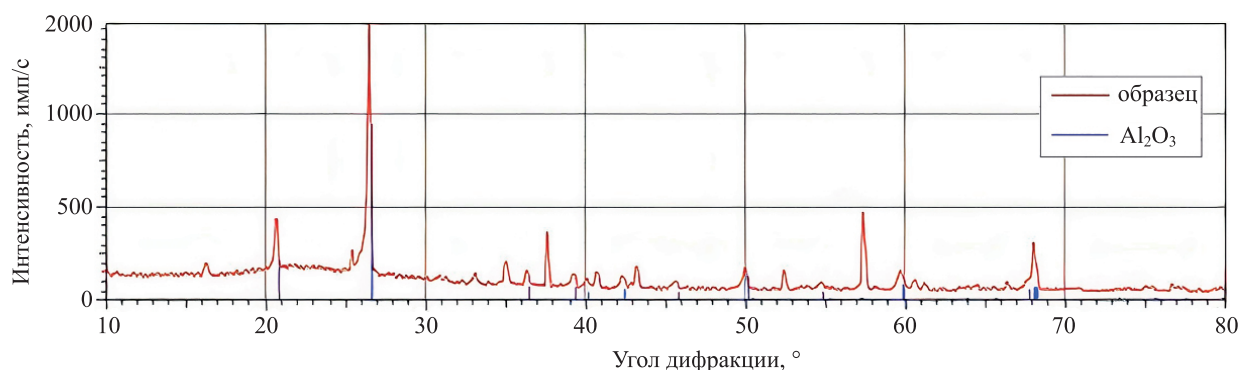


Рис. 2. Дифрактограмма образца корунда и Al_2O_3

Fig. 2. Diffraction pattern of a corundum and Al_2O_3 sample

Заключение

Полученный результат показал, что необходимо выполнить дальнейшие эксперименты по плавлению глинозема, с использованием в качестве рабочего газа смесь аргона и азота, так как молибденовый тигель не пригоден для плавления в окислительной атмосфере воздуха. Также для получения однородного по структуре кристалла необходимо определить режим

остывания расплава, возможно, с поддерживающими плазматронами. Планируются к проведению еще несколько экспериментов.

Предложенная технология может внести вклад в развитие направления получения плазменными методами различных монокристаллов (например, так называемого «солнечного кремния») и плазменной металлургии для получения чистого алюминия с меньшими энергозатратами.

Литература

References

1. Попова А.Н., Клименков Б.Д., Грабовский А.Ю. Научная школа плазменных нанотехнологий и энергетики Горного университета // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29. № 2. С. 317–336. doi: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336
2. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
3. Наливайко А.Ю., Лысенко А.П. Новая технология получения оксида алюминия, пригодного для производства искусственных кристаллов корунда // Цветная металлургия. 2014. № 5. С. 44–46.
4. Школьников Е.И., Лисицын А.В., Власкин М.С., Жук А.З., Шейндлин А.Е. Способ получения корунда высокой чистоты. Патент № RU2519450. Бюл. 2014. № 16.
5. Grinberg E.E., Sudarikova E.Yu., Syrychko V.V., Strel'nikova I.E., Potelov V.V., Baranov K.V. Technological aspects of preparation of high-purity compounds for sol-gel and pyrolytic synthesis methods // Glass Physics and Chemistry. 2008. V. 34. N 4. P. 515–518. doi: 10.1134/S1087659608040238
6. Shi A., Hu G., Wang Y., Jia J. A kind of preparation method of high-purity aluminum oxide powder material. Patent CN103043692B. 2012. (in Chinese)
7. Liang L.J., Jin H., Jun W.K., Qin Z.X. Preparation of high-purity alumina by hydrolyzing high-purity metal aluminum // Advanced Materials Research. 2010. V. 105-106. P. 805–807. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.105-106.805
8. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 2. С. 36–41. doi: 10.17580/tsm.2020.02.04
9. Марширов И.В. Футеровка плавильных печей литейного производства: учебное пособие. Барнаул: Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова, 2010. 136 с.
10. Белоглазов И.И., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С., Савченков С.А., Кисон В.Э., Фурсенко В.В., Лербаум В.В., Анисимов Д.О., Анисимова А.Ю. Плазменная печь для получения корунда. Патент RU2746655C1. Бюл. 2021. № 11.
11. Лочер Д.У., Занелла С.Э., Маклин Р.Л., Бэте Х.И. Монокристалл сапфира, способ его изготовления и используемое в нем плавильное устройство. Патент № RU2388852C2. Бюл. 2010. № 13.
12. Kison V., Mustafaev A., Sukhomlinov V. Plasma torch working gas selection rationale for the production technology of ultrapure white corundum // KnE Life Sciences. 2021. P. 247–254. doi: 10.18502/cls.v0i0.8954
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.
14. Хомич В.А., Рябцев А.В., Дидык Е.Г., Жовтянский В.А., Назаренко В.Г. Моделирование процессов образования атомарного азота в плазме тлеющего разряда в смеси азот-аргон // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36. № 19. С. 91–99.
15. Будин А.В., Коликов В.А., Рутберг Ф.Г. Влияние величины тока и температуры рабочего газа на эрозию электродов разрядной камеры мощных импульсных плазматронов // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 8. С. 49–53.
16. Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 968 с.
17. Субботин Д.И., Кузнецов В.Е., Литвякова А.И., Черепкова И.А., Суров А.В., Наконечный Г.В., Сподобин В.А. Исследование продуктов эрозии медного электрода плазматрона переменного
1. Popova A.N., Klimenkov B.D., Grabovskiy A.Y. Scientific school of plasma nanotechnologies and plasma power engineering in Mining University. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 317–336. (in Russian). doi: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336
2. Mintcis M.Ia., Poliakov P.V., Sirazutdinov G.A. *Electrometallurgy of Aluminum*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001, 368 p. (in Russian)
3. Nalivaiko A.Iu., Lysenko A.P. New technology for obtaining aluminum oxide suitable for the production of artificial corundum crystals. *Cvetnaja Metallurgija*, 2014, no. 5, pp. 44–46. (in Russian)
4. Shkol'nikov E.I., Lisitsyn A.V., Vlaskin M.S., Zhuk A.Z., Shejndlin A.E. Method of obtaining high purity corundum. *Patent RU2519450*, 2014. (in Russian)
5. Grinberg E.E., Sudarikova E.Yu., Syrychko V.V., Strel'nikova I.E., Potelov V.V., Baranov K.V. Technological aspects of preparation of high-purity compounds for sol-gel and pyrolytic synthesis methods. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 515–518. doi: 10.1134/S1087659608040238
6. Shi A., Hu G., Wang Y., Jia J. A kind of preparation method of high-purity aluminum oxide powder material. *Patent CN103043692B*, 2012. (in Chinese)
7. Liang L.J., Jin H., Jun W.K., Qin Z.X. Preparation of high-purity alumina by hydrolyzing high-purity metal aluminum. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 105-106, pp. 805–807. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.105-106.805
8. Gorlanov E.S., Brichtkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium: Review. Part 1. Conventional areas of development. *Tsvetnye Metally*, 2020, no. 2, pp. 36–41. (in Russian). doi: 10.17580/tsm.2020.02.04
9. Marshirov I.V. *Lining of Melting Furnaces in Foundries*. Tutorial. Barnaul, Polzunov Altai State Technical University, 2010, 136 p. (in Russian)
10. Beloglazov I.I., Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S., Savchenkov S.A., Kison V.E., Fursenko V.V., Lerbaum V.V., Anisimov D.O., Anisimova A.Iu. Plasma furnace for corundum production. *Patent RU2746655C1*, 2021. (in Russian)
11. Locher D.U., Zanella S.E., Maklin R.L., Behts Kh.I. Sapphire monocrystal, method of making said monocrystal (versions) and melting device used therein. *Patent RU2388852C2*, 2010. (in Russian)
12. Kison V., Mustafaev A., Sukhomlinov V. Plasma torch working gas selection rationale for the production technology of ultrapure white corundum. *KnE Life Sciences*, 2021, pp. 247–254. doi: 10.18502/cls.v0i0.8954
13. Landau L.D., Lifshite E.M. *Theoretical Physics. Vol. 6. Fluid Mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1986, 736 p. (in Russian)
14. Khomich V.A., Ryabtsev A.V., Didyk E.G., Zhovtyansky V.A., Nazarenko V.G. Numerical simulation of atomic nitrogen formation in plasma of glow discharge in nitrogen-argon mixture. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, no. 10, pp. 918–922. doi: 10.1134/S1063785010100135
15. Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg F.G. Influence of the current magnitude and working gas temperature on electrode erosion in the discharge chambers of high-power pulsed plasmotrons. *Technical Physics*, 2007, vol. 52, no. 8, pp. 1011–1015. doi: 10.1134/S1063784207080087
16. Tumanov Iu.N. *Plasma, High-Frequency, Microwave and Laser Technologies in Chemical and Metallurgical Processes*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010, 968 p. (in Russian)

- тока // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 11. С. 1637–1640. doi: 10.21883/JTF.2017.11.45122.2064
18. Gabdrakhmanov T., Israphilov I.H., Galiakbarov A.T. The study the erosion of the electrodes under the influence moving electric arc // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 567. P. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/567/1/012013
 19. Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Orshanskaya E.G., Galevskiy S.G., Mishne I. Modeling and experimental study of the electrodes erosion of plasma torch EDP-104A in nitrogen plasma // *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 2020. V. 866. P. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/866/1/012022
 20. Кисон В.Э., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С. Использование плазмотронов повышенного напряжения при производстве сверхчистых материалов // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии для подготовки специалистов минерально-сырьевого комплекса». 2020. С. 1607–1614.
 21. Surov A.V., Popov S.D., Popov V.E., Subbotin D.I., Serba E.O., Spodobin V.A., Nakonechny G.V., Pavlov A.V. Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances // *Fuel*. 2017. V. 203. P. 1007–1014. doi: 10.1016/j.fuel.2017.02.104
 17. Subbotin D.I., Kuznetsov V.E., Litvyakova A.I., Cherepkova I.A., Surov A.V., Nakonechny G.V., Spodobin V.A. Investigations of products of copper electrode erosion in an AC plasmatron. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 11, pp. 1639–1642. doi: 10.1134/S1063784217110275
 18. Gabdrakhmanov T., Israphilov I.H., Galiakbarov A.T. The study the erosion of the electrodes under the influence moving electric arc. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 567, pp. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/567/1/012013
 19. Galevskiy G.V., Rudneva V.V., Orshanskaya E.G., Galevskiy S.G., Mishne I. Modeling and experimental study of the electrodes erosion of plasma torch EDP-104A in nitrogen plasma. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2020, vol. 866, pp. 012022. doi: 10.1088/1757-899X/866/1/012022
 20. Kison V.E., Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S. Se of plasmotrons of high voltage in the production of superfine materials. *Proc. of the 3rd all-Russian scientific conference "Modern Education Technologies for Training Specialists in the Field of Mineral Resources"*, 2020, pp. 1607–1614. (in Russian)
 21. Surov A.V., Popov S.D., Popov V.E., Subbotin D.I., Serba E.O., Spodobin V.A., Nakonechny G.V., Pavlov A.V. Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances. *Fuel*, 2017, vol. 203, pp. 1007–1014. doi: 10.1016/j.fuel.2017.02.104

Авторы

Кисон Виктория Эдуардовна — аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0001-9584-8474>, kison.vika@mail.ru
Мустафаев Александр Сеит-Умерович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, [sc 7003632979](http://orcid.org/0000-0003-2554-8526), <http://orcid.org/0000-0003-2554-8526>, alexmustafaev@yandex.ru

Сухомлинов Владимир Сергеевич — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, [sc 6603487586](http://orcid.org/0000-0002-9986-4209), <http://orcid.org/0000-0002-9986-4209>, v_sukhomlinov@mail.ru

Authors

Viktoriia E. Kison — Postgraduate, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0001-9584-8474>, kison.vika@mail.ru
Alexander S. Mustafaev — D.Sc., Full Professor, Head of Department, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, [sc 7003632979](http://orcid.org/0000-0003-2554-8526), <http://orcid.org/0000-0003-2554-8526>, alexmustafaev@yandex.ru

Vladimir S. Sukhomlinov — D.Sc., Full Professor, Head of Laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, [sc 6603487586](http://orcid.org/0000-0002-9986-4209), <http://orcid.org/0000-0002-9986-4209>, v_sukhomlinov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2021
 Одобрена после рецензирования 15.04.2021
 Принята к печати 18.05.2021

Received 12.02.2021
 Approved after reviewing 15.04.2021
 Accepted 18.05.2021



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»