

К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда

© П.С. Паляницин, П.А. Петров, В.Ю. Бажин

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – изучение и определение перспективных направлений и технических решений для повышения ресурсосбережения и энергоэффективности в производстве корунда, на основе проведенного патентного исследования по совершенствованию и оптимизации плавки. Пути оптимизации процесса получения корунда рассматривались по трем направлениям с точки зрения энергосбережения. Первое направление связано с развитием перспективных технических разработок, которые были изучены для выбора рациональных рабочих режимов и определения основных факторов, влияющих на скачки напряжения в течение технологического процесса и выход годной продукции. Рассмотрены условия для снижения удельных энергозатрат и повышение экологичности производства на всех стадиях от изотермического спекания корунда, получения электрокорунда, мелкокристаллического корунда до монокристаллов корунда. Второе направление – оптимизация производства корунда на всех стадиях для разработки оптимального алгоритма управления технологическим процессом, при этом возможно снижение расхода электроэнергии на 10–12% по сравнению с действующими нормативами. Третье направление – разработка технических решений с изменением отдельных конструктивных узлов печных агрегатов, а именно: использование современных комплектующих и новых теплоизоляционных материалов, а также применение отработанных теплоносителей в качестве источников вторичных энергоресурсов, ввод дополнительных контроллеров автоматизированной системы управления процессом. Аналитическое исследование показало, что результатом оптимизации должны являться модернизированные конструкции установок и электрического оборудования, которые могут обеспечить максимальный электрохимический КПД и соответствующую герметичность печей. Разработаны критерии энергоснабжения и качества электроэнергии, позволяющие стабилизировать материальный баланс печи и решить вопросы ресурсосбережения. Данные мероприятия позволяют снизить потерю сырья до 20–25%, удельное энергопотребление в процессе производства корунда на 2–3 тыс. кВт·ч на 1 т.

Ключевые слова: энергосбережение, производство корунда, глинозем, энергопотребление, коэффициент полезного действия, оптимизация технологического процесса

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания по проекту № FSRW-2020-0014 на 2020 год. Тема: «Развитие междисциплинарных направлений комплексного освоения недр земли и сохранения природы». Направление (тематика на 2020 год): Аналитический обзор и разработка концепции комплексной переработки минерального и техногенного сырья с газификацией твердого углеводородного сырья.

Для цитирования: Паляницин П.С., Петров П.А., Бажин В.Ю. К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1347–1356. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1347-1356>

Issues of resource and energy saving in corundum production

Pavel S. Palyanitsin, Pavel A. Petrov, Vladimir Yu. Bazhin

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The purpose of this article is study and identification of the most promising trends and engineering solutions in order to improve resource saving and energy efficiency in the production of corundum on the basis of the conducted patent review on melting improvement and optimization. The ways to optimize the corundum production are considered in three directions from the point of view of energy saving. The first direction relates to the development of promising engineering developments. The latter are studied to select rational operating modes and determine the main factors affecting voltage surges during the technological process and useful product yield. Consideration is given to the conditions for reducing specific energy consumption and improvement of production environmental friendliness at all stages beginning from isothermal sintering of corundum, production of electrocorundum, fine corundum to single corundum crystals. The second direction is the optimization of corundum production at all stages for the development of an optimal control algorithm for the technological process. In this case the electricity consumption might be reduced by 10–12% as compared to current standards. The third direction is the development of engineering solutions involving the change of individual struc-

tural units of furnaces, namely, the use of modern components and new heat insulating materials, as well as the application of spent heat carriers as the sources of secondary energy resources and the introduction of additional controllers of the automated control system of the process. The analytical study has shown that the result of optimization should be upgraded designs of plants and electrical equipment, which can provide maximum electrochemical efficiency, and corresponding furnace tightness. Criteria for energy supply and energy quality making possible to stabilize furnace material balance and solve resource saving issues have been developed. These measures allow to reduce the loss of raw materials up to 20-25%, the specific energy consumption under the production of corundum by 2-3 thousand kWh per 1 t.

Keywords: energy saving, corundum production, alumina, energy consumption, efficiency, process optimization

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment for the project no. FSRW-2020-0014 for 2020. Topic: "Development of interdisciplinary directions of integrated development of subsoil and nature conservation". Direction (theme for 2020): Analytical review and development of the concept of complex processing of mineral and man-made raw materials with gasification of solid hydrocarbon raw materials.

For citation: Palyanitsin PS, Petrov PA, Bazhin VYu. Issues of resource and energy saving in corundum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1347–1356. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1347-1356>

ВВЕДЕНИЕ

Вопросами получения корунда занимаются ученые и производственники по всем мире [1–7].

Основной проблемой в получении искусственных корундов является высокая стоимость сырья (Al_2O_3 – оксида алюминия с содержанием 99,9%). Значительные его потери связаны с газопылеуносом (15–20%), переходом в излишние настывы и с фазовыми переходами в различные модификации Al_2O_3 при отклонениях технологического режима плавки. Наиболее остро стоят вопросы энергосбережения в производстве белого корунда, когда расход электроэнергии может превышать 18–20 тыс. кВт·ч на 1 т.

Вопросы энергосбережения во всех сферах не могут игнорироваться на фоне экспоненциального роста потребления энергоресурсов и выпуска готовых продуктов, а также из-за факта ограниченности ресурсов [8–12]. Корунд, с точки зрения использования полезно-применимых свойств, является основой таких материалов как силикатные огнеупоры, твердые режущие материалы, комбинированные блоки для металлургических печей. К основным направлениям энергосберегающих мероприятий в производстве корунда в электротермических печах относят повышение качества электроэнергии в часы ограничений, стабилизацию нагрузки от трансформаторов в заданных пределах, а также снижение затрат энергии на сопутствующие операции и уменьшение удельных затрат энергии на единицу готового материала при сохранении

соблюдения предъявляемых к нему требований [13].

Корунды относят к искусственным материалам, представляющим собой кристаллический α -оксид алюминия (Al_2O_3). Основная особенность данного материала – его твердость, по данному показателю корунд уступает только алмазу (9 – твердость корунда по шкале Мооса). Благодаря этому свойству корунды и получили широкое применение как абразивный материал и теплоизоляторы, а также в ювелирном деле, в изготовлении лазеров, точных механизмов, оптических устройств, в военном деле [14–16].

Основная проблема при производстве искусственного корунда – высокая стоимость сырья для его производства (оксид алюминия чистотой более 99%), которая вызвана сложностью используемого аппаратного оформления многочисленных переделов [17]. Оксид алюминия такой чистоты получают из металлургического глинозема, с чистотой до 99,7% (марка Г-000), который требует дополнительной очистки. Очистка глинозема от примесей химическим способом реализована за рубежом [18, 19]. Именно примеси влияют на технологические режимы металлургических печей и расход электроэнергии, срок службы и производительность [20]. В этой связи представляет научно-технический интерес рассмотрение вопросов, связанных с изменением формы рабочего пространства (ФРП) печи и влиянием количества примесей, в частности, натрия на изменение ФРП до загрузки шихты, во время плавления и по-

сле окончания производственного цикла. Так, в печах по производству корунда АО «РУСАЛ Бокситогорск» при превышении содержания натрия в шихте, особенно при неравномерной амперной нагрузке в ванне, возникают зоны, связанные с ростом настелей боковой футеровки. В дальнейшем это приводит к изменению теплового баланса печи и потерям сырья.

В России одним из передовых производителей корунда, изделий и материалов из него является Бокситогорский глиноземный завод АО «РУСАЛ Бокситогорск» (Бокситогорск, Ленинградская обл.). Основным трендами компании являются ресурсосбережение и вопросы, связанные со снижением «углеродного следа» (расход дорогостоящих электродов печей). При выплавке белого электрокорунда ввиду легкой подвижности нагретого глинозема происходит вынос части его из электропечи вместе с отходящими газами [20]. Из закрытых сводом электропечей мощностью 5500–6500 кВт·А унос мелких частиц глинозема в процессе плавки составляет 180–200 кг/ч, причем при плавке предварительно глубоко прокаленного глинозема пылеунос снижается и составляет около 65–70 кг/ч. Для решения подобных задач необходима аналитическая оценка существующих металлургических технологий, связанных с выбросами CO и CO₂, разработка технологий утилизации сажи и углерода с последующей переработкой до товарной продукции (наноматериалы и технический углерод). Применение электрофильтров в специальной противоточной камере с осадительными элементами позволяет улавливать до 90% всей массы улетающих из печи частиц глинозема и углерода (сажи).

Следовательно, необходима разработка технических и технологических мероприятий по уменьшению удельного расхода электроэнергии до 15–16 кВт·ч на 1 т корунда при снижении выбросов твердого углерода в виде пыли и газов, которые можно утилизировать. Также стоит рассмотреть возможность газификации углеродной пыли, например, которая содержится в диоксиде углерода, что описано в работе [21].

Для снижения энергозатрат и повышения

эффективности производства корундов в данной работе были определены три направления исследований: модернизация и совершенствование технологического процесса; повышение эффективности процесса за счет качества управления процессом и технологическими параметрами; разработка технических решений по энергосбережению за счет корреляционной связи энергоснабжающих (трансформаторов) и потребляющих установок (рудотермических печей (РТП)), включая основной металлургический агрегат, печь РТП (метод сквозной автоматизации).

РЕШЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОРУНДА

Одним из эффективных способов совершенствования технологического процесса получения корунда является использование новых технических решений и инновационных технологий, которые ведут к повышению качества продукции и снижению энергоемкости этого процесса [22].

В исследовании [23] рассматривается эксперимент по изотермическому спеканию корунда, подвергнутого механоактивации (МА) в присутствии добавок алюминатной природы. Использовался порошок корунда (ТУ 2-036-00224450-022-09), который состоит из α -Al₂O₃ с величиной удельной поверхности равной 150 м²/кг, алюмоборфосфатное связующее (ТУ 133-08-606-87) со значением плотности 1590 кг/м³. В качестве добавок были выбраны легко разлагающиеся при нагревании боксит Североонежского месторождения, 2Al₂O₃·B₂O₃·5H₂O-борат алюминия, а также нитрат алюминия Al(NO₃)₃. В качестве активатора использовалась планетарная мельница высокой энергонапряженности. В результате интенсивность спекания при 1750⁰С обычного корунда и при 1300⁰С активированного в течение 15–20 мин почти одинаковы, что позволяет уменьшить температуру обжига с сохранением интенсивности спекания. Наиболее эффективная добавка в данном процессе – борат алюминия. В нашем случае для стабилизации теплового и материального баланса печи эта добавка приведет к снижению общей температуры

процесса при сохранении его интенсивности (увеличению силы тока), а также к снижению энергоемкости процесса, и, как следствие, к уменьшению удельных энергозатрат на единицу готового материала. Полученный результат может быть объяснен снижением энергии активации процесса и интенсификации спекания корунда при добавках 2–4% боксита, нитрата алюминия, бората алюминия к порошкообразному корунду с алюмоборфосфатным связующим и следующей МА смеси в течение 5–10 мин.

Анализ показал, что предварительная механоактивация глинозема повышает удельную поверхность частиц, увеличивая скорость их растворения в расплаве, а также объем и состав добавок оказывают влияние на энергию активации при спекании корунда, от которой зависит энергоемкость процесса в целом. В этой связи подтверждается актуальность изучения влияния различных добавок в процессе производства корунда на температурный режим процесса и другие показатели. Особенно это касается вопроса текущего изменения ФРП.

В патенте [24] описывается способ получения электрокорунда дешевле и с более высокой термостойкостью, по сравнению с белым электрокорундом, а также с низкой температурой спекания при постоянном объеме, по сравнению с нормальным электрокорундом для огнеупорных материалов. Новый тип электрокорунда имеет более высокий уровень физико-химических свойств, который лучше, чем у прототипов. При этом по данной технологии удастся также снизить удельный расход электроэнергии на 1 т получаемого электрокорунда от 2766 кВт·ч до 1555 кВт·ч. Особенностью данного способа получения электрокорунда является то, что в процессе плавки производят ввод дополнительного глинозема (40–60 масс. %) и предварительно термообработанного боксита, состоящего из Al_2O_3 (82–93%), SiO_2 (3–10%), TiO_2 (2–5%), Fe_2O_3 (1,5–2%), $\Sigma CaO+MgO$ (0,2–0,3%) и прочих примесей, а плавление шихты происходит в окислительно-восстановительной среде.

Описанный патент также подтверждает эффективность добавок в процессе произ-

водства корунда для формирования правильной ФРП.

В техническом решении [25] описан способ для получения мелкокристаллического корунда. Особенность данного метода состоит в том, что отходы электротехнической проволоки, которые состоят не менее чем на 99,5% из алюминия, подвергаются электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде, напряжение на электродах составляет 90 В, частота импульсов 50 Гц, емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ. Данный процесс был ранее апробирован в лабораториях кафедры металлургии Горного университета. Это позволяет получать корунд с низкой себестоимостью, который в особенности характеризуется отсутствием газовых выделений и более низкими затратами энергии, то есть в процессе интенсивного взаимодействия с водой происходит выделение водорода с образованием мелкодисперсного оксида алюминия с переходом в корунд высшего сорта при последующем нагреве. Средний показатель затрат электроэнергии при данном способе составляет 2,1 кВт·ч/т. Данный показатель ниже, чем у других способов получения корунда. Данное решение интересно тем, что процесс происходит в несколько этапов: подготовка к электроэрозионному диспергированию, сортировка алюминиевых отходов, их промывка, сушка, обезжиривание. Контролируется частота следования импульсов, емкость конденсаторов, напряжение на электродах. При реализации данного способа, в нашем случае, при плавке на белый корунд через изменения значений технологических параметров можно контролировать текущий уровень электропотребления. Важно, что при диспергировании к электродам прикладывается импульсное напряжение генератора, а далее – к алюминиевым отходам (алюминиевые отходы служат в качестве электродов также). Если происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве при достижении определенного напряжения, то образуется канал разряда. Материал в этой точке разряда плавится и испаряется из-за высокой концентрации тепловой энергии, изменяется рабочая среда,

которая окружена газообразными продуктами распада в канале разряда. В результате появляющихся в газовом пузыре и канале разряда значительных динамических сил, капли расплавленного материала выбрасываются в рабочую среду за границы зоны разряда, затем капли застывают в рабочей среде, образуют частицы порошка оксида алюминия. На третьем этапе проводится выгрузка рабочей жидкости с порошком из реактора. При этом достигается следующий технический результат: получен оксид алюминия (корунд) в виде частиц правильной сферической формы, из которого плавлением получают корунд высшего качества без примесей. Этот способ позволяет получать корунд без использования химических реагентов, что значительно снижает себестоимость, а также позволяет исключить загрязнение химическими веществами сам расплав и окружающую среду. Такой подход подтверждает актуальность вопроса, связанного качеством электроэнергии и стабилизацией электрических параметров в заданных пределах в зависимости от теплового баланса самого технологического процесса.

Техническое решение [26] содержит описание промышленного способа получения оксида алюминия, пригодного для получения монокристаллов корунда, а также повышение удельной производительности и электрохимического выхода при снижении трудоемкости.

Данный электрохимический способ включает анодное растворение алюминия в водном растворе хлористого натрия, отделение гидроксида алюминия и прокаливание. Особенность данного способа: концентрация раствора хлорида натрия составляет 30–300 г/дм³, анодное растворение алюминия осуществляется с помощью выпрямленного тока по двухполупериодной схеме с плотностью тока от 0,015 А/см² до 0,045 А/см²; температура, при которой происходит прокаливание гидроксида алюминия, составляет от 600⁰С до 1350⁰С. Также данный метод отличается тем, что осадок гидроксида алюминия подвергается отмыванию, фильтрации и подаче на прокаливание. Удельная производительность данного метода составляет от 228 г/кВт·ч до 349 г/кВт·ч, данный показатель у

прототипа находится в пределах от 75 г/кВт·ч до 83 г/кВт·ч. Электролит – водный раствор хлорида натрия заливают в электролизер, концентрация раствора находится в указанном интервале, алюминиевые электроды помещают туда же. Выпрямленный ток по двухполупериодной схеме пропускают через ячейку, сила тока постоянна – соответствующая плотности тока 0,015 А/см². Уровень электролита поддерживается постоянным в процессе электролиза. Полученный по окончании осадок гидроксида алюминия подвергается отмывке, фильтрации и прокаливанию в течение 2 ч при 600⁰С.

Способ получения пластинчатого корунда, описанный в работе [27], включает формирование брикета из тонкоизмельченного оксида алюминия или гидроксида алюминия, высокотемпературный обжиг и дробление брикета производят перед обжигом, который проводят при температуре 1990⁰С в печи лучистого нагрева в течение 10–30 мин. Данный способ сравнивается с двумя известными способами получения пластинчатого корунда. Первый: получение пластинчатого корунда, который включает формирование брикета из тонкоизмельченных материалов, его обжиг в печах периодического действия или туннельных печах с выдержкой 20 ч при температуре 1750⁰С. Второй: включает прессование тонкоизмельченных порошкообразных оксидов или гидроксидов алюминия в брикеты и высокотемпературный обжиг при температуре 1650⁰С в шахтных или вращающихся печах с выдержкой от 0,5 ч до 1 ч. Недостатками данных способов являются низкая чистота получаемого корунда, длительность выдержки. Получаемый эффект заключается в снижении энергоемкости технологического процесса в целом за счет снижения продолжительности обжига. Увеличение размеров получаемых кристаллов при сохранности чистоты кристаллов достигается за счет исключения тепловых потерь футеровки печи и при дроблении высокопрочного брикета. Важным является, то подобные способы получения корунда подтверждают важность оптимального температурного режима печи, который влияет на продолжительность и энергоемкость технологического процесса.

Проведенные патентный обзор и анализ новых решений в электрохимических процессах, связанных с использованием алюминий-содержащей шихты, указывают на актуальность и реальную возможность разработки новой энергосберегающей технологии выплавки корунда. Предположительно, что регулирование энергетических параметров РТП при продувке углекислым газом позволит получать продукт с меньшим содержанием примесей.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В работе [28] автором был составлен алгоритм оптимального управления технологическим процессом производства электрокорунда на основе его динамической модели, были проведены вычислительные испытания алгоритма. С целью подтверждения эффективности алгоритма был осуществлен ряд опытных плавов на действующей печи № 1 РКО–10,5 цеха № 2 ОАО «Запорожский абразивный комбинат».

Описанный в работе [28] алгоритм управления технологическим процессом производства нормального электрокорунда в составе системы «Энергия СУ01» перешел в опытно-промышленную эксплуатацию комбината. В дальнейшем планируется принять и дополнить существующую систему управления тем, что каждое управляющее звено должно быть оптимизировано, а также необходимо производить оптимальные управляющие воздействия на каждый управляющий параметр в целях обеспечения качества управления процессом и технологическими параметрами.

Полученные результаты, которые были подтверждены практикой на действующем предприятии, свидетельствуют о необходимости оптимизации управления технологическим процессом производства корундов в целях повышения эффективности процесса.

Получение корунда связано с использованием высоких температур, применением электрической и других видов энергии. В любой реальной технологической установке будут иметь место необратимые потери энергии – следствие несовершенства процесса

[29]. Конструкции установок должны обеспечивать максимально полное использование подводимой энергии, а также минимально возможные потери в окружающую среду. Меры энергосбережения подразумевают использование любого отработанного тепла технологической установки в качестве вторичных энергоресурсов [30]. Для обеспечения энергоэффективного протекания процесса установки должны быть оснащены системами, обеспечивающими автоматизированное управление процессом [31–34].

Анализ существующих технических решений показал, что к энергосберегающим технологиям в процессе производства корунда можно отнести следующие:

- применение новых теплоизоляционных материалов и сохранение герметичности печей, данные меры позволяют снизить потери тепла в окружающую среду, соответственно, снизить энергоемкость реального процесса;
- использование тепла установки, тепла охлаждающих теплоносителей и тепла готового материала в качестве вторичных тепловых энергоресурсов, а также использование переработанных углеродистых отходов в качестве вторичных горючих энергоресурсов, в частности, как этап газификации;
- использование систем автоматизированного управления технологического процесса;
- оптимальная конструкция установок и электрического оборудования, обеспечивающая максимальный электрохимический КПД.

Использование современных комплектующих, новых конструкторских решений и теплоизоляционных материалов, применение автоматизированных систем управления технологическими процессами обеспечивают повышение качества и воспроизводимости процессов роста кристаллов, также данные меры ведут к снижению до 25% удельного энергопотребления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены вопросы, касающиеся энергосбережения в процессе получения корунда. В данной сфере были выделены и освещены три направления.

1. Модернизация непосредственно самих технологий получения корунда – повышение эффективности процесса на величину от 10% до кратного увеличения выхода продукции при тех же энергозатратах. Данный факт говорит о необходимости постоянного поиска, совершенствования и внедрения новых инновационных способов и технологий производства, которые будут иметь преимущества перед уже используемыми.

2. Оптимизация управления технологическим процессом получения корунда. За счет реализации оптимального алгоритма управления данным процессом может быть получено сокращение расхода электроэнергии до 10%.

3. Энергосберегающие решения конструкций установок, включающие комплексные и широкие решения, такие как использование отработанных в качестве вторичных энергоресурсов теплоносителей, применение сквозной системы автоматизации, оптималь-

ных конструкций энергоустановок при использовании теплоизоляционных материалов нового типа для сохранения герметичности, позволят снизить общую энергоемкость процесса до 25%.

Данный факт говорит о необходимой качественной проектной и конструкторской работе над разработкой установок и следующей за ними работе по их производству.

Очевиден следующий факт: для получения максимального эффекта меры энергосбережения должны применяться комплексно, которые приведут к снижению энергоемкости производства, повышению выхода продукта, в сочетании с уменьшением расхода глинозема, энергоресурсов, а в отдельных случаях – к повышению экологичности процесса. Для такого материала как корунд, который имеет широкое применение и высокую стоимость, снижение энергоемкости производства имеет высокое значение для промышленности и экономики в целом.

Список литературы

1. Nižankowski C. Manufacturing sintered corundum abrasives // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2002. Vol. 2. P. 53–64. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
2. Zeidler S., Posch Th., Mutschke H. Mid-infrared properties of corundum, spinel, and α -quartz, potential carriers of the 13 μ m feature // Astronomy and Astrophysics. 2013. Vol. 553. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220459>
3. Богданов С.П., Гаршин А.П., Сычев М.М. Бронекерамика на основе порошков корунда "ядро-оболочка" // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. XI Междунар. симпозиума: в 2 ч. (г. Минск, 10–12 апреля 2019 г.). Минск: ИД «Белорусская наука», 2019. Ч. 1. С. 424–430.
4. Nadolny K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74. P. 1445–1457. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
5. Данчевская М.Н., Ивакин Ю.Д., Багдасаров Х.С., Антонов Е.В., Костомаров Д.В., Панасюк Г.П. Синтетический мелкокристаллический корунд – новое сырье для выращивания лейкосапфира // Перспективные материалы. 2009. № 4. С. 28–33.
6. Li Zi-cheng, Li Zhi-hong, Zhang Ai-ju, Zhu Yu-mei. Influence of thermal treatment conditions on two-dimensional crystal growth of nanocrystal corundum abrasives // Materials Research Bulletin. 2009. Vol. 44. Issue 4. P. 762–767.
7. McCormick M. Asia-Pacific leading world's corundum production [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indmin.com/Article/3499879/Regulation-LatestNews/Asia-Pacific-leading-worlds-corundum-production.html> (07.08.2020).
8. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Alborov A.D. Research and mathematical modeling of the thermal and power performance of resistance furnaces at metallurgical enterprises // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. Vol. 641. P. 630–636. http://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_69
9. Жуковский Ю.Л., Сизякова Е.В. Внедрение системы энергосбережения и энергоэффективности на предприятиях металлургического комплекса // Записки горного института. 2013. № 202. С. 155–160.
10. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ (С-8Б) // Цветные металлы. 2016. № 3. С. 35–41. <http://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>
11. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 9-10. P. 973–977. <http://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>
12. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. Екатеринбург: ОАО «УИПЦ», 2012. 670 с.
13. Косенко Н.Ф., Филатова Н.В., Грехнев А.Ю. Кине-

тика активированного изотермического спекания корунда // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49. № 4. С. 56–58.

14. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for civil engineer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>

15. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 94. P. 186–192. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>

16. Педро А.А. Роль химического взаимодействия электрода с расплавом в изменении гармонического состава тока в электродах // Электротехника. 1997. № 4. С. 27–30.

17. Лысенко А.П., Серёдкин Ю.Г., Зенькович Г.С. Электролитический способ получения Al_2O_3 чистотой 99,99–99,999% // Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы: сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 13–15 мая 2009 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2009. С. 322–323.

18. Лысенко А.П., Серёдкин Ю.Г., Зенькович Г.С. Механизм электролитического получения оксида алюминия, пригодного для производства монокристаллов корунда // Технология металлов. 2009. № 12. С. 8–12.

19. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. No. 3. P. 292–296. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9971-0>

20. Корнеев С.В., Трусова И.А. Управление шлаковым режимом в электродуговых печах // Литье и металлургия. 2017. № 4. С. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-48-52>

21. Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П. Газификация пористых частиц углерода в диоксиде углерода // Химическая физика. 2010. № 12. С. 18–23.

22. Ватулин И.И., Минков О.Б., Сухарев А.В., Сухарев В.А., Шингарев Э.Н. Высокотемпературное алюминиотермическое восстановление оксида кальция // Материаловедение. 2009. № 3. С. 46–50.

23. Косенко Н.Ф., Филатова Н.В., Шиганов А.А. Кинетика активированного изотермического спекания корунда в присутствии алюминатных добавок // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 2. С. 193–196.

24. Пат. № 2347766С2, Российская Федерация, С04В 35/107. Электрокорунд и способ его получения / В.А. Перепелицын, А.С. Зубов, И.В. Кормина, Л.А. Карпец, Е.М. Гришпун, А.М. Гороховский. Заявитель и патентообладатель ОАО "Первоуральский динасовый завод" (ОАО "ДИНУР"). Заявл. 16.04.2007; опубл. 27.02.2009.

25. Пат. № 2664149С2, Российская Федерация, С01F

7/42. Способ получения мелкокристаллического корунда / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU). Заявл. 21.03.2016; опубл. 15.08.2018.

26. Пат. № 2366608С1, Российская Федерация, С01F 7/42. Способ получения оксида алюминия, пригодного для производства монокристаллов корунда / А.П. Лысенко, В.А. Бекишев, Ю.Г. Серёдкин, Г.С. Зенькович. Заявители и патентообладатели: Лысенко Андрей Павлович (RU), Бекишев Владимир Афанасьевич (RU), Серёдкин Юрий Георгиевич (RU). Заявл. 08.05.2008; опубл. 10.09.2008.

27. Пат. № 1 104 798 А1, СССР, С01F 7/02. Способ получения пластинчатого корунда / Д.С. Рутман, Н.М. Пермикина, С.А. Азимов, Г.Т. Адылов, А.Г. Белогрудов. Заявитель и патентообладатель Восточный научно-исследовательский и проектный институт огнеупорной промышленности, Физико-технический институт АН УССР. Заявл. 08.04.1983; опубл. 23.08.1991.

28. Качан Ю.Г., Мных А.С. Алгоритм динамической оптимизации процесса производства электрокорунда нормального на базе метода терминального управления // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2008. № 32. С. 48–56.

29. Педро А.А., Сулов А.П. Вентильный эффект в электродной печи // Цветные металлы. 2012. № 12. С. 37–41.

30. Peretyatko M.A., Yakovlev P.V., Peretyatko S.A., Deev A.S., Dyachenok G.V. The study of heat transfer during boiling process of organic fluid // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1614. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012069>

31. Shurygin Y.A. Technologies of organizational energy saving at metallurgical enterprises // International Russian Automation Conference (Sochi, 9–16 September 2018). Sochi: IEEE, 2018. <http://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501605>

32. Дубовиков О.А., Яскейянен Э.Э. Переработка низкокачественного бокситового сырья способом термохимия-Байер // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 668–674. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668>

33. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А., Карлина А.И. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 3. С. 131–138.

34. Белоглазов И.И., Сулов А.П., Педро А.А. Изменение постоянной составляющей фазного напряжения при плавке циркониевого электрокорунда // Цветные металлы. 2014. № 5. Р. 86–89.

References

1. Nižankowski C. Manufacturing sintered corundum abrasives. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2002;2:53–64. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>

2. Zeidler S, Posch Th, Mutschke H. Mid-infrared properties of corundum, spinel, and α -quartz, potential carriers of the 13 μ m feature. *Astronomy and Astrophysics*. 2013;553.

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220459>

3. Bogdanov SP, Garshin AP, Sychev MM. Armor ceramics based on corundum core-shell powders. In: *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: sbornik dokladov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: collected reports of XI International symposium: 10–12 April 2019, Minsk. Minsk: Belorusskaya nauka; 2019, part. 1, p. 424–430.*
4. Nadolny K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74:1445–1457. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
5. Danchevskaya MN, Ivakin YuD, Bagdasarov ChS, Antonov EV, Kostomarov DV, Panasyuk GP. Synthetic fine-crystalline corundum – new raw material for leucosapphire single crystals growth. *Perspektivnye materialy*. 2009;4:28–33. (In Russ.)
6. Li Zi-cheng, Li Zhi-hong, Zhang Ai-ju, Zhu Yu-mei. Influence of thermal treatment conditions on two-dimensional crystal growth of nanocrystal corundum abrasives. *Materials Research Bulletin*. 2009;44(4):762–767. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.09.026>
7. McCormick M. Asia-Pacific leading world's corundum production. Available from: <https://www.indmin.com/Article/3499879/Regulation-LatestNews/Asia-Pacific-leading-worlds-corundum-production.html> [Accessed 07th August 2020].
8. Klyuev RV, Bosikov II, Alborov AD. Research and mathematical modeling of the thermal and power performance of resistance furnaces at metallurgical enterprises. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020;641:630–636. http://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_69
9. Zhukovskiy YL, Sizyakova EV. The introduction of the system of energy saving and energy efficiency at the enterprises of metallurgy. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2013;202:155–160. (In Russ.)
10. Pingin VV, Tretyakov YaA, Radionov EYu, Nemchinova NV. Modernization prospects for the bus arrangement of electrolyzer S-8BM (S-8B). *Tsvetnye metally*. 2016;3:35–41. (In Russ.) <http://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>
11. Shakhrai SG, Nemchinova NV, Kondrat'ev VV, Mazurenko VV, Shcheglov EL. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases. *Metallurgist*. 2017;60(9-10):973–977. <http://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>
12. Yaroshenko YuG, Gordon YaM, Khodorovskaya IYu. *Energy-efficient and resource-saving technologies of ferrous metallurgy*. Ekaterinburg: UIPTs; 2012, 670 p. (In Russ.)
13. Kosenko NF, Filatova NV, Grekhnev AYU. Kinetics of activated isothermal sintering of corundum. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. Series: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2006;49(4):56–58. (In Russ.)
14. Rashad AM. Vermiculite as a construction material – a short guide for civil engineer. *Construction and Building Materials*. 2016;125:53–62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>
15. Kariya J, Ryu J, Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*. 2016;94:186–192. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>
16. Pedro AA. Role of electrode chemical interaction with the melt in changing harmonic composition of current in electrodes. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 1997;4:27–30. (In Russ.)
17. Lysenko AP, Seryodkin YuG, Zen'kovich GS. Electrolytic production method of Al_2O_3 with the purity of 99.99–99.999%. *Metallurgiya cvetnykh metallov. Problemy i perspektivy: sbornik tezisev dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Metallurgy of Non-Ferrous Metals. Problems and Prospects: collected abstracts of the reports of the International scientific and practical conference. 13–15 May 2009, Moscow. Moscow: MISIS; 2009, p. 322–323. (In Russ.)*
18. Lysenko AP, Seryodkin YuG, Zen'kovich GS. Mechanism of electrolytic obtaining of aluminum oxide suitable for the production of corundum single crystals. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*. 2009;12:8–12. (In Russ.)
19. Gorlanov ES, Bazhin VYu, Fedorov SN. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016;57(3):292–296. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9971-0>
20. Korneev SV, Trusova IA. Management of the slag adjustment in arc furnaces. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2017;(4):48–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-48-52>
21. Gremyachkin VM, Mazanchenko EP. Gasification of porous carbon particles in carbon dioxide. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*. 2010;12:18–23. (In Russ.)
22. Vatulin II, Minkov OB, Suharev AV, Suharev VA, Shingarev EN. High-temperature aluminothermic reduction of calcium oxide. *Materialovedenie*. 2009;3:46–50. (In Russ.)
23. Kosenko NF, Filatova NV, Shiganov AA. Effect of aluminate additions on the isothermal sintering kinetics of mechanically activated corundum. *Neorganicheskie materialy*. 2007;43(2):193–196. (In Russ.)
24. Perepelitsyn VA, Zubov AS, Kormina IV, Karpets LA, Grishpun EM, Gorokhovskiy AM. *Electrocorundum and its production method*. Patent RF, no. 2347766C2; 2009. (In Russ.)
25. Novikov EP, Ageev EV, Ageeva EV, Altukhov AYU. *Production method of fine-crystalline corundum*. Patent RF, no. 2664149C2; 2018. (In Russ.)
26. Lysenko AP, Bekishev VA, Seryodkin YuG, Zenkovich GS. *Obtaining method of the aluminum oxide suitable for the production of corundum single crystals*. Patent RF, no. 2366608C1; 2008. (In Russ.)
27. Rutman DS, Permikina NM, Azimov SA, Adylov GT, Belogrudov AG. *Production method of lamellar corundum*. Patent RF, no. 1 104 798 A1; 1991. (In Russ.)

28. Kachan YuG, Mnykh AS. Algorithm for dynamic optimization of normal electrocorundum production based on terminal control method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2008;32:48–56.
29. Pedro AA, Suslov AP. Valve action in the electrode furnace. *Tsvetnyye metally*. 2012;12:37–41. (In Russ.)
30. Peretyatko MA, Yakovlev PV, Peretyatko SA, Deev AS, Dyachenok GV. The study of heat transfer during boiling process of organic fluid. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1614.
<http://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012069>
31. Shurygin YA. Technologies of organizational energy saving at metallurgical enterprises. In: *International Russian Automation Conference*. 9–16 September 2018, Sochi. Sochi: IEEE; 2018.
<http://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501605>

32. Dubovikov OA, Yaskelyainen EE. Processing of low-quality bauxite feedstock by thermochemistry-Bayer method. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;221:668–674. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668>
33. Shakhrai SG, Skuratov AP, Kondratiev VV, Ershov VA, Karlina AI. Justification of the possibility of heating alumina by aluminum electrolyzer anode gases warmth. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;3:131–138. (In Russ.)
34. Beloglazov II, Suslov AP, Pedro AA. Change of constant component of phase voltage during melting of zirconium corundum. *Tsvetnye Metally*. 2014;5:86–89. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Паляницин Павел Сергеевич,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21 линия, 2, Россия;
✉ e-mail: ppalyanitsin@yandex.ru

Петров Павел Андреевич,
кандидат технических наук,
декан факультета переработки минерального сырья,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: petrov_pa3@pers.spmi.ru

Бажин Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: bazhin-alfail@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.10.20; одобрена после рецензирования 25.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel S. Palyanitsin,
Postgraduate Student,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: ppalyanitsin@yandex.ru

Pavel A. Petrov,
Cand. Sci. (Eng.),
Dean of the Faculty of Mineral Raw Material Processing,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: petrov_pa3@pers.spmi.ru

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: bazhin-alfail@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 07.10.20; approved after reviewing 25.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.