



Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах

© Р.Ю. Фещенко, О.О. Ерохина, Р.Н. Еремин, Б.Э. Матыльский

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

Резюме: Цель – анализ и систематизация существующих методов повышения окислительной стойкости углеграфитовой продукции, а также оценка их применимости относительно металлургических и химических агрегатов. Обзор научных данных, описывающих механизм окисления углеграфитовых материалов, условий их применения в металлургических и химических процессах, а также существующих технологий по повышению окислительной стойкости искусственных графитов. Описаны существующие представления о кинетике окисления углеграфитов в зависимости от температурных режимов. Проведен обзор существующих технологий повышения окислительной стойкости материалов и их экономической эффективности с учетом условий их эксплуатации. Проанализированы перспективные варианты внедрения представленных решений для агрегатов металлургической и химической отраслей промышленности. Показано, что принципиально можно выделить три режима окисления графитированных материалов, которые определяются условиями эксплуатации, а также их химическими и физическими свойствами. С учетом этого может быть выбран наиболее рациональный метод повышения окислительной стойкости: пропитка с формированием защитного стеклообразного покрытия в объеме сквозных пор или при образовании покрытия – сплошного слоя на поверхности изделия за счет протекания химической реакции с используемыми реагентами. Для большинства металлургических и химических агрегатов более предпочтительной является пропитка углеграфитовых материалов с образованием боратных и фосфатных стекол, что обусловлено, в первую очередь, более низкими экономическими издержками. Применимость данного метода в настоящее время ограничивается температурными режимами, при которых сохраняются защитные свойства и сплошность сформированных стеклообразных покрытий. Поэтому для адаптации известных технологических и технических решений в этой области к высокотемпературным условиям металлургических агрегатов (свыше 800°C) необходимо добавить проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: углеграфитовые электроды, дуговые печи, окисление графита, пропитка, силицирование, стекловидные покрытия

Для цитирования: Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Еремин Р.Н., Матыльский Б.Э. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 380–390. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>

Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units

Roman Yu. Feshchenko, Olga O. Erokhina, Roman N. Eremin, Bronislav E. Matylskiy

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This review study analyses the existing methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products, as well as assesses their applicability in metallurgical and chemical units. The research basis was the data published on the oxidation mechanism of carbon-graphite materials, conditions for their use in metallurgical and chemical processes, as well as existing technologies aimed at improving the oxidation resistance of artificial graphites. The existing ideas about the kinetics of carbon graphite oxidation are described depending on temperature conditions. A review of existing technologies for increasing the oxidation resistance of materials and their economic efficiency, taking into account the conditions of their operation, was carried out. Prospects of the presented solutions for the units of metallurgical and chemical industries were analysed. Three modes of oxidation of graphitised materials were distinguished on the basis of operating conditions, chemical and physical properties. According to this classification, the most rational method for increasing oxidation resistance consists in the impregnation of carbon-graphite materials with the formation of a protec-

tive glassy coating in the volume of through pores or with the formation of a coating (a continuous layer on the surface of the product) due to the occurrence of a chemical reaction with the reagents used. For most metallurgical and chemical units, the impregnation of carbon-graphite materials with the formation of borate and phosphate glasses is preferable, primarily due to lower economic costs. The applicability of this method is currently limited by temperature conditions, at which the protective properties and continuity of the formed glassy coatings are preserved. Therefore, additional research is required to adapt the conventional technological and technical solutions to the high-temperature conditions of metallurgical units (over 800°C).

Keywords: carbon-graphite electrodes, arc furnaces, graphite oxidation, impregnation, siliconizing, glass-like coatings

For citation: Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Eremin R.N., Matylskiy B.E. Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):380–390. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из искусственного графита имеют широкое применение в промышленности, что обусловлено свойствами данного материала, а именно – высокой тепло- и электропроводностью, а также химической стойкостью при удовлетворительных механических показателях [1–6]. Фактором, ограничивающим применение изделий из искусственного графита, является их низкая стойкость к окислению кислородом воздуха и некоторых других окислителей при повышенных температурах, что характерно для всех углеродсодержащих материалов.

Склонность к окислению обуславливает необходимость применения различных специфических технических решений, обеспечивающих снижение содержания окислителя в газовой фазе, например проведение процессов под вакуумом или в среде инертных газов. В ряде случаев отсутствует возможность создания регулируемой газовой атмосферы в технологическом агрегате, например при проведении плавки в дуговых и руднотермических печах, при получении магния и алюминия электролитическим способом; окисление изделий из углеродистых материалов является неизбежным фактором экономических издержек. Масштабность применения таких процессов обуславливает целесообразность поиска решений повышения устойчивости к высокотемпературному окислению как за счет направленного формирования специальной структуры углеродистых материалов посредством внесения изменений в технологический процесс их производства, так и за счет применения специальных решений по формированию защитных слоев.

МЕХАНИЗМ ОКИСЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ГРАФИТА

В процессе окисления углеродистых материалов могут быть выделены следующие стадии: диффузия окислителя вглубь образца, формирование углерод-оксидных связей и протекание непосредственно химической реакции, отвод продуктов окисления. В зависимости от температуры окисления каждая из этих стадий может определять скорость протекания процесса. Считается, что при низких температурах лимитирующей стадией является химическая реакция, при высоких – внешняя диффузия, а в интервале между ними – внутренняя [7, 8]. Пограничные температуры могут сильно меняться для различных сортов и видов углеродистых материалов, и для некоторых отраслей промышленности в настоящее время они не определены.

В низкотемпературном режиме, характерном для изделий, эксплуатируемых в ряде металлургических агрегатов (например, магниевых и алюминиевых электролизерах), окисление происходит в объеме графита, поскольку у молекул окислителя есть свободный доступ к активному объему пор. В режиме внутренней диффузии проникновение окислителя внутрь пор затруднено противотоком продуктов реакции. В режиме внешней диффузии окисление происходит только по поверхности изделия, что приводит к ее резкой и быстрой эрозии. Такой режим чаще всего характерен для углеродистых материалов, эксплуатируемых в ядерной энергетике и машиностроении.

Реакционная способность графита зависит от ряда факторов, в том числе размера кристаллитов, количества дефектов кристал-

лической решетки (рост числа которых упрощает формирование углерод-оксидных связей), количества поверхностных дефектов (трещин и пор), а также их глубины, развитости поверхности изделий [9–11] и степени графитизации. При низкой степени графитизации структура изделия имеет меньшую степень упорядоченности (с соответствующей турбостратификацией), что создает локальные очаги интенсивного окисления. При этом искусственные графиты с низкой степенью графитизации обладают повышенным межплоскостным расстоянием, что упрощает диффузию окислителя вглубь образца. Степень графитизации также имеет значительное влияние на температуру начала окисления и скорость данного процесса.

Существуют различные математические модели процессов окисления углеродистых [10], однако они носят специфичный характер, и их применимость ограничивается условиями эксплуатации конкретных изделий. Это связано с варьированием параметров углеродистых материалов, определяемых особенностями изготовления (технологическими режимами, составами и др.), а также спецификой эксплуатации.

Приборные методы анализа также не являются универсальными для оценки скорости окисления углеродистых материалов, поскольку, например, термогравиметрический анализ обычно проводится на образцах, полученных путем прессования предварительного измельченного исходного материала, не отражая, таким образом, морфологию и свойства самого изделия [12–14]. Поэтому целесообразно скорость окисления оценивать на образцах представительного размера, как, например, это закреплено стандартом ISO для предварительно обожженных анодов алюминиевых электролизеров.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ГРАФИТА

Существует ряд различных методов повышения стойкости к окислению углеродистых материалов. Основой для рационального выбора метода защиты должно являться изучение кинетики окисления в каждом конкретном случае.

Классифицировать методы защиты можно по температурам эксплуатации (наиболее полно описаны изделия, применяемые при температурах до 900 и свыше 1500°C), способу нанесения (ручной, погружение в технологическую среду, осаждение из газовой фазы и т.д.), структуре образующегося защитного слоя (керамическая или стекловидная) и глубине его проникновения (создание защитного слоя на поверхности или сквозная пропитка изделия). Наиболее принципиальным различием с технологической точки зрения является последний фактор. Пропитка обеспечивает защиту по всему объему изделия, включая поверхность, а также сквозные каналы пор и трещины, поэтому скорость окисления для такого изделия по мере его изнашивания (уменьшения площади сечения) будет постоянной, при этом более низкой, чем для необработанного материала. Защитный слой обеспечивает более эффективное снижение скорости окисления, но при этом, в случае его механического повреждения, может произойти быстрое локальное разрушение.

ОБРАЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Для высокотемпературных условий эксплуатации в диапазоне свыше 1200°C широкое распространение получили керамические покрытия на поверхности изделий из синтетического графита [15], чаще всего на основе карбида кремния, которые позволяют в значительной степени увеличивать стойкость к окислению [16–19]. Формирование данных покрытий происходит за счет пропитки изделий жидким или газообразным кремнием при повышенных температурах (свыше 2000°C) без доступа кислорода. За счет химических реакций образуется поверхностный слой карбида кремния, характеризующийся высокой стойкостью к окислению, отличной электро- и теплопроводностью, а также хорошо выраженной твердостью. Полученное изделие может использоваться в окислительных условиях при температурах до 1600°C и выше [20, 21].

Наиболее простым способом создания покрытий на основе карбида кремния является использование расплавов кремния и со-

путствующих соединений. Силицирование углеграфитовых материалов включает несколько этапов [22–26], в том числе: смачивание образца жидким кремнием; инфильтрация кремния в поры под действием капиллярных сил, которая заканчивается при заполнении пор; образование карбида кремния. Предположительно образование карбида кремния происходит в несколько этапов: первичный, протекающий с высокой скоростью, и вторичный, протекание которого затруднено по причине замедленного диффузирования реагентов через слой первичного карбида кремния. Особенности протекания данного процесса определяют требования по пористости углеграфитового материала: в случае преобладания развитых узких пор глубина пропитки будет низкой вследствие их зарастания карбидом кремния. Критичным является радиус пор менее 1 мкм [27].

Другим классическим способом силицирования графита является обработка графита газообразным кремнием, пример которой при температуре 1380°C описан в [28]. Заявленным результатом в работе явилось повышение окислительной стойкости при 1000°C, ее оценивали по величине потери массы при выдержке в изотермических условиях, которая составила 76%.

Для повышения защитных свойств карбидокремниевых покрытий могут быть использованы модифицирующие добавки, чаще всего тугоплавкие: такие, например, как оксид гафния, диборид (или фосфат) циркония, оксид алюминия, диборид циркония и др. Они обеспечивают стабильное повышение долгосрочной устойчивости к окислению при температурах до 1650°C, краткосрочной при 1900°C. Основными методами нанесения таких покрытий являются химическое осаждение из газовой фазы или ручное нанесение суспензий модифицирующих добавок с последующей двухстадийной термической обработкой. Так, например, в работе [29] предварительно дробили крупные компоненты сырьевой смеси, включающей 20–35% Si, 25–40% C, 2–4% SiB₄, 0,1–0,9% SiO₂, 1–3% HfO₂ и до 100% остальное – SiC, полученную смесь формовали прессованием при температуре 180–200°C и подвергали высоко-

температурной термообработке при 1650–1800°C. Результатом являлось повышение циклической термостойкости при температуре 1650°C. В работе [30] защитные покрытия, сформированные из различных смесей соединений диборида циркония, карбида кремния, фосфата циркония и фосфата кремния, и отвержденные в температурном диапазоне от 25 до 100°C, характеризовались долгосрочной устойчивостью при температурах от 1300 до 1600°C и краткосрочной (5 мин) при 1900°C. Формирование покрытий при совместном использовании газообразного азота и кремния при 1450–1650°C также благоприятно влияет на окислительную стойкость при совместном увеличении твердости слоя SiC в 10–15 раз [31]. Наибольшей длительной окислительной стойкостью характеризовались силицированные графиты при нанесении суспензий, содержащих 33 масс.% ZrB₂, 9 масс.% SiC, 8 масс.% TaSi₂, связующее – 1 масс.% поливинилбутираль и 49 масс.% этилового спирта с дальнейшей их термообработкой. Данные образцы способны выдерживать температуры свыше 1700°C [32, 33].

Пример экспериментального определения повышения устойчивости к окислению графитового изделия за счет формирования модифицированного покрытия из карбида кремния представлен на рис. 1.

ПРОПИТКА ОБРАЗЦОВ РАСТВОРАМИ СОЛЕЙ

Для повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, эксплуатируемых при температурах ниже 900°C (например, графитовые электроды, используемые в качестве анодов магниевых электролизеров с верхним вводом [34–36]) более целесообразным в сравнении с формированием керамического покрытия является применение пропитки растворами. Состав растворов подбирается таким образом, чтобы в ходе последующей термической обработки сформировать защитное стеклообразное покрытие на поверхности пор материала. Основными стеклообразующими компонентами являются соединения фосфора и бора.

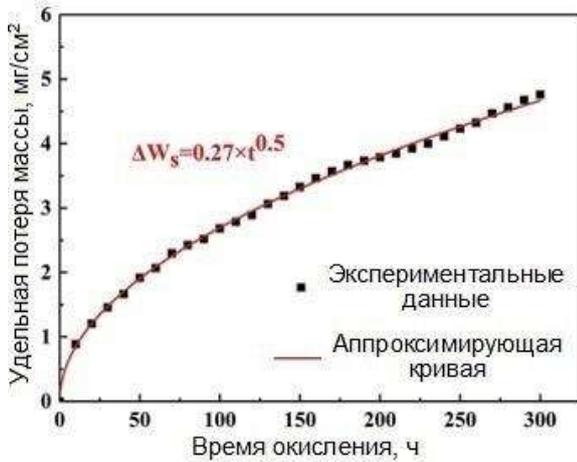


Рис. 1. Кинетика окисления образца при температуре 1500°C в течение 300 ч [33]
Fig. 1. Oxidation kinetics of a sample at the temperature of 1500°C for 300 hours [33]

Основанием для выбора раствора может являться его комплексный термический анализ (дифференциальная сканирующая калориметрия (от англ. differential scanning calorimetry DSC), совмещенная с термогравиметрией (от англ. thermogravimetry TG)), который позволяет определить температуру начала разрушения образующегося покрытия, ограничивающую температуру эксплуатации конечного продукта. Кроме того, по результатам комплексного термического анализа также можно подобрать условия термиче-

ской обработки изделия после пропитки, обеспечивающие полноту протекания реакций полимеризации и/или кристаллизации (рис. 2).

Механизм образования стекловидных покрытий включает разложение, дегидратацию, полимеризацию и кристаллизацию фосфатной/боратной составляющих пропиточных растворов при нагревании. Существенное влияние на термические превращения, происходящие в пропиточных растворах, оказывают введенные в них модифицирующие добавки. При этом отсутствует единый обоснованный подход к подбору оптимального пропиточного раствора. В качестве добавок могут быть использованы кальций, алюминий, калий, цинк, натрий и другие элементы. На текущий момент наибольшее распространение получили растворы, содержащие алюминий и его соединения (метафосфаты и гидроксиды).

Принципиально пропиточные составы можно наносить различными методами. Наиболее простым из описанных в литературных источниках является нанесение раствора кистью (например, смесь борной кислоты, растворимого стекла и SiO₂ [38]), однако подобные методы требуют последующей термообработки при относительно высоких

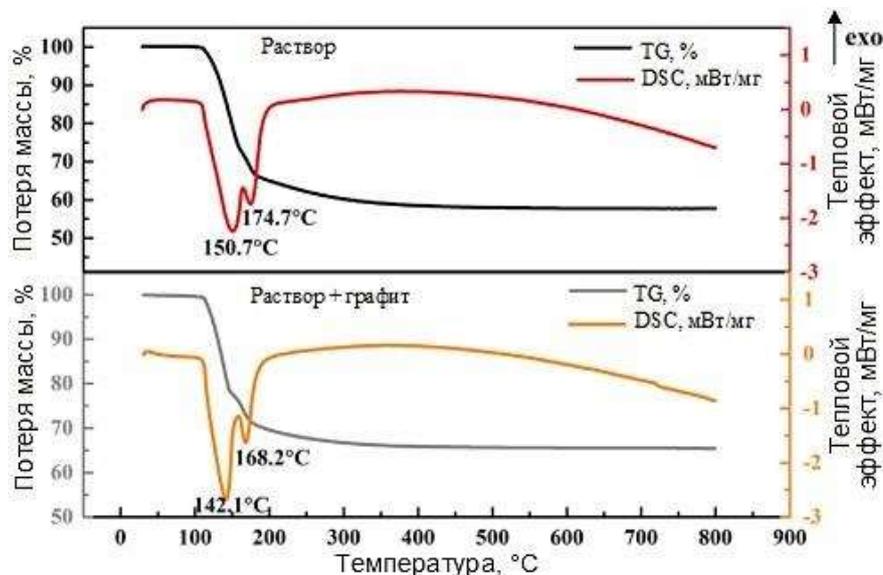


Рис. 2. Результаты комплексного термического анализа для пропиточного раствора и обработанного им порошкового графита [37]
Fig. 2. Results of an integrated thermal analysis for the impregnation solution and powdered graphite treated with it [37]

температурах (до 800°C), при этом глубина проникновения раствора будет невелика, а итогом является снижение скорости окисления графита при температуре не более 750°C. Более широкое применение получили методы пропитки непосредственным погружением в раствор, при этом существует зависимость между окислительной стойкостью конечного изделия и рядом параметров технологических процессов пропитки и последующей термообработки. Проникновение раствора в поры графита происходит за счет капиллярных сил, при этом целесообразно обрабатываемое изделие предварительно выдержать под разрежением для удаления газов из пор. Для изделий с большим поперечным сечением пропитку можно проводить под избыточным давлением для повышения глубины проникновения раствора.

В открытых источниках описано повышение окислительной стойкости графита при пропитке различными растворами. Так, например, пропитка графита погружением в раствор, состоящий из фосфорной кислоты, борной кислоты, дигидрофосфата алюминия, декагидрата тетрабората натрия и деионизированной воды в мольном соотношении 20:5:9:2:160, с дальнейшей термообработкой до 400°C позволяет получать изделия с повышенной окислительной стойкостью при температуре 500°C [37]. В то время как пропитка в вакууме три-трет-бутил боратом с последующим гидролизом, смешением порошковой борной кислоты, оксида бора или бората аммония и термообработкой при 500°C на воздухе позволяет сформировать покрытия, характеризующиеся повышением окислительной стойкости при температурах свыше 1000°C [39]. При пропитке под вакуумом электродного графита смесью дигидрофосфатов алюминия и цинка в лабораторных условиях обеспечено повышение устойчивости к окислению на модельных образцах в 4–5 раз [40].

Несмотря на множество различных составов, успешный опыт применения которых описан в открытых источниках, отсутствует сравнительный анализ полученных результатов в сопоставимых условиях, что значительно затрудняет подбор рационального пропи-

точного состава в зависимости от условий эксплуатации графита.

Пропитка углеграфитовых изделий в сравнении с формированием защитных покрытий проще с технологической точки зрения, осуществляется с применением более дешевых компонентов, а ее заключительная стадия – термообработка – производится при более низких температурах. Совокупность этих факторов способствует меньшим экономическим издержкам [38–40].

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В слабоагрессивных окислительных средах вместо дополнительной обработки углеграфитовых изделий экономически может быть более обоснованным варьирование качественных характеристик самого материала. Решению целевой задачи – понижению реакционной способности поверхности изделий – может способствовать повышение упорядоченности структуры, а также уменьшение межплоскостного расстояния. Достичь этого можно за счет корректировки технологического режима процесса графитации. При этом необходимо учитывать негативное влияние повышения количества поверхностных дефектов, которому способствует увеличение температуры графитации [41, 42].

Также повышению стойкости к окислению может способствовать улучшение физических характеристик материалов (например, более низкая пористость и высокая плотность). Для достижения этого целесообразно применять комплексный подход, включающий как корректировку состава и качества сырьевых материалов, так и подбор оптимальных режимов технологических процессов. Наиболее очевидными решениями для снижения пористости изделий из искусственного графита является снижение содержания связующего и повышение глубины прокаливания твердого углеродного наполнителя в шихтовой смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор рационального метода повышения окислительной стойкости углеграфитовых изделий в первую очередь связан с условия-

ми их дальнейшей эксплуатации. Так, силицирование является значительно более дорогостоящим методом, однако при этом обеспечивает возможность эксплуатировать графитовые изделия при температурах до 1600°C с сохранением структуры и свойств изделий.

Методы пропитки фосфатами и боратами получили широкое распространение для изделий, эксплуатация которых ведется до температур ниже 900°C. Формирование стеклообразных покрытий значительно дешевле, однако существуют нерешенные проблемы при их производстве, в том числе систематизация накопленного опыта для обоснования оптимального состава раствора и методов проведения пропитки, а также обеспечение

даже кратковременной стойкости к окислению при температурах свыше 1000°C. Предполагается, что свыше 600–700°C образовавшееся покрытие может начать возгораться, что также отрицательно влияет на его эффективность и безопасность условий труда при эксплуатации таких изделий.

По этим причинам задача получения устойчивых к высокотемпературному окислению изделий из синтетического графита является актуальной и нерешенной даже для таких крупномасштабных областей его применения, как дуговые сталеплавильные печи. Значимость этого направления возросла в последние годы в связи с резким подорожанием электродного графита на мировом рынке.

Список литературы

1. Fan Ling, Ma Ruifang, Zhang Qingfeng, Jia Xinxin, Lu Bingan. Graphite anode for a potassium ion battery with unprecedented performance // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58. Iss. 31. P. 10500–10505. <https://doi.org/10.1002/anie.201904258>
2. Bazhin V.Yu., Saitov A.V. Improvement of physical and performance characteristics of carbon graphite lining by lithium additives // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 1. P. 48–53. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0181-9>
3. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Iss.1-2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
4. Якушевич П.А., Немчинова Н.В., Гавриленко Л.В. Изучение технологических параметров получения углеродсодержащего продукта из техногенного сырья ОАО «РУСАЛ Братск» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 8. С. 161–168. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-161-168>
5. Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Сундуров А.В. Роль термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 1032–1041. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>
6. Theodosiou A., Jones A.N., Burton D., Powell M., Rogers M., Livesey V.B. The complete oxidation of nuclear graphite waste via thermal treatment: an alternative to geological disposal // *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 507. P. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.002>
7. Theodosiou A., Jones A.N., Marsden B.J. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option // *Plos one*. 2017. Vol. 12. No. 8. P. 0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>
8. Paul R.M. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite // *Journal of Nuclear Materials*. 2020. Vol. 543. P. 152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>
9. Muzyka R., Kwoka M., Smędowski Ł., Díez N., Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods // *New Carbon Materials*. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 15–20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1)
10. Smith R.E., Kane J.J., Windes W.E. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades // *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 545. P. 152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>
11. Kondrasheva N.K., Ereemeeva A.M., Nelkenbaum K.S., Baulin O.A., Dubovikov O.A. Development of environmentally friendly diesel fuel // *Petroleum Science and Technology*. 2019. Vol. 37. No. 12. P. 1478–1484. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1594285>
12. Li Chang, Chen Xi, Shen Liming, Bao Ningzhong. Revisiting the oxidation of graphite: reaction mechanism, chemical stability, and structure self-regulation // *ACS omega*. 2020. Vol. 5. No. 7. P. 3397–3404. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03633>
13. Skákalová V., Kotrusz P., Jergel M., Susi T., Mittelberger A., Vretenár V. et al. Chemical oxidation of graphite: evolution of the structure and properties // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2018. Vol. 122. No. 1. P. 929–935. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10912>
14. Bystrov M.V., Yachikov I.M., Portnova I.V. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 966. No. 1. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012019>

15. Behboudi F., Kakroudi M.G., Vafa N.P., Faraji M., Milani S.S. Molten salt synthesis of in-situ TiC coating on graphite flakes // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 8161–8168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.172>
16. Konno H., Kinomura T., Habazaki H., Aramata M. Formation of oxidation resistant graphite flakes by ultrathin silicone coating // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 194. Iss. 1. P. 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.04.079>
17. Пат. № 2685654, Российская Федерация, С01В 32/21, С01В 32/956, С04В 35/532, С04В 35/565. Способ изготовления изделий из мелкозернистого силицированного графита / В.М. Бушуев, М.В. Бушуев; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов». Заявл. 10.01.2018; опубл. 22.04.2019. Бюл. № 12.
18. Пат. № 2685675, Российская Федерация, С01В 32/21, С01В 32/956, С04В 35/565, С04В 35/532. Способ изготовления изделий из ультрамелкозернистого силицированного графита / В.М. Бушуев, М.В. Бушуев; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов». Заявл. 20.12.2017; опубл. 22.04.2019. Бюл. № 12.
19. Fujii K., Nakano J., Shindo M. Improvement of the oxidation resistance of a graphite material by compositionally gradient SiC/C layer // *Journal of Nuclear Materials*. 1993. Vol. 203. Iss. 1. P. 10–16. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90424-W](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90424-W)
20. Zhu Qingshan, Qiu Xueliang, Ma Changwen. Oxidation resistant SiC coating for graphite materials // *Carbon*. 1999. Vol. 37. Iss. 9. P. 1475–1484. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00010-X)
21. Wang Peipei, Li Hejun, Ren Xuanru, Yuan Ruimei, Hou Xianghui, Zhang Yulei. HfB₂-SiC-MoSi₂ oxidation resistance coating fabricated through in-situ synthesis for SiC coated C/C composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 722. P. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.008>
22. Dezellus O., Jacques S., Hodaj F., Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon // *Journal of Materials Science*. 2005. Vol. 40. No. 9-10. P. 2307–2311. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1950-7>
23. Shikunov S.L., Kurlov V.N. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices // *Technical Physics*. 2017. Vol. 62. No. 12. P. 1869–1876. <https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
24. Savchenko D.V., Serdan A.A., Morozov V.A., Van Tendeloo G., Ionov S.G. Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation // *New Carbon Materials*. 2012. Vol. 27. Iss. 1. C. 12–18. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(12\)60001-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(12)60001-8)
25. Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Орехов Т.В., Сорокин О.Ю. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2012. Т. 55. № 6. С. 12–16.
26. Ершов А.Е., Шикунев С.Л., Курлов В.Н. Метод расчета фазового состава SiC-Si-C-материалов, получаемых силицированием углеродных матриц // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. Вып. 6. С. 888–895. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44512.1913>
27. Кошелев Ю.И., Бубненко И.А., Швецов А.А., Бардин Н.Г., Сорокин О.Ю., Макаров Н.А. Силицированный графит: физико-химические основы получения и перспективы развития. Часть 3. Влияние тепловых эффектов и примесных элементов в кремнии и углеродном материале на процесс силицирования // *Техника и технология силикатов*. 2017. Т. 24. № 3. С. 11–15.
28. Chunhe Tang, Jie Guan. Improvement in oxidation resistance of the nuclear graphite by reaction-coated SiC coating // *Journal of Nuclear Materials*. 1995. Vol. 224. Iss 1. P. 103–108. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(95)00031-3)
29. Пат. № 2392250, Российская Федерация, С04 35/577, С04В 35/80. Керамический композиционный материал / Д.В. Гращенков, Н.В. Исаева, С.С. Солнцев, Г.В. Ермакова; заявитель и патентообладатель Российская Федерация в лице Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). Заявл. 29.04.2009; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17.
30. Patent no. 6632762, The United States of America, Int. Cl. C04B 35/565. Oxidation resistant coating for carbon / I.G. Talmy, K.J. Ashkenazi; The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. No. 09/987,493. Filed 15.11.2001; publ. 14.10.2003.
31. Patent no. 20100310860, The United States of America. Int. Cl. B32B 9/00, C23C 16/32, C23C 16/34. Synthetic method for anti-oxidation ceramic coatings on graphite substrates / J.U. Jung, S.W. Myoung, J.H. Kang, Kim Jeong-Pyo; Changwon National University Industry Academy Cooperation Corps. No. 12/745,276. Filed 28.02.2008; publ. 28.05.2010.
32. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Yuhai, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Iss. 12. P. 15366–15374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>
33. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500°C in air // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 5. P. 6254–6261. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>
34. Liu Cheng-Lin, Zhao Qian-Wen, Sun Ze, Lu Gui-Min, Yu Jian-Guo. Analysis of magnesium droplets characteristics and separation performance in a magnesium electrolysis cell based on multiphysical modeling // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. No. 11. P. 5965–5976. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3148-8>
35. Haarberg G.M. Trends and challenges for electrowinning of aluminium and magnesium from molten salt electrolytes // *TMS. 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. 2020. Cham: Springer,

2020. P. 1911–1922. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_176

36. Gorlanov E.S. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020. Vol. 24. No. 6. P. 1324–1336.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-00-00>

37. Lin Yingfei, Liu Tianlong, Wang Juan, Lu Jianning, Dong Xiaorong, Feng Xiaowei. Fabrication and oxidation resistance behavior of phosphate/borate impregnation for graphite // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 389. P. 125632.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125632>

38. Zeng Guisheng, Xie Gang, Yang Dajin, Wang Dajian, Zhang Xiongfei. Oxidation resistivity of boride coating of graphite anode sample // *Materials Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 95. Iss. 1. P. 183–187.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.053>

39. McKee D.W. Borate treatment of carbon fibers and carbon/carbon composites for improved oxidation re-

sistance // *Carbon*. 1986. Vol. 24. Iss. 6. P. 737–741.

[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(86\)90183-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(86)90183-1)

40. Фещенко Р.Ю., Еремин Р.Н., Ерохина О.О., Дыдин В.М. Повышение окислительной стойкости графитированных блоков для электролитического производства магния методом пропитки фосфатными растворами. Часть 1 // *Цветные металлы*. 2020. № 10. С. 49–55.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>

41. De Tomas C., Suarez-Martinez I., Vallejos-Burgos F., Lopez M.J., Kaneko K., Marks N.A. Structural prediction of graphitization and porosity in carbide-derived carbons // *Carbon*. 2017. Vol. 119. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.004>

42. Li Kejiang, Zhang Hang, Li Guangyue, Zhang Jianliang, Bouhadja M., Liu Zhengjian, et al. ReaxFF molecular dynamics simulation for the graphitization of amorphous carbon: a parametric study // *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2018. Vol. 14. No. 5. P. 2322–2331. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b01296>

References

1. Fan Ling, Ma Ruifang, Zhang Qingfeng, Jia Xinxin, Lu Bingan. Graphite anode for a potassium ion battery with unprecedented performance. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019;58(31):10500–10505. <https://doi.org/10.1002/anie.201904258>

2. Bazhin VYu, Saitov AV. Improvement of physical and performance characteristics of carbon graphite lining by lithium additives. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;59(1):48–53. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0181-9>

3. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting. *Metallurgist*. 2018;62(1-2):150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>

4. Yakushevich PA, Nemchinova NV, Gavrilenko LV. Study of technological parameters of obtaining carbon-containing product from technogenic raw materials of «RUSAL Bratsk» JSC. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;8:161–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-161-168>

5. Sizyakov VM, Dubovikov OA, Ris AD, Sundurov AV. Role of thermal activation in alumina production from low-quality bauxites. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(5):1032–1041. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>

6. Theodosiou A, Jones AN, Burton D, Powell M, Rogers M, Livesey VB. The complete oxidation of nuclear graphite waste via thermal treatment: an alternative to geological disposal. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;507:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.002>

7. Theodosiou A, Jones AN, Marsden BJ. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option. *Plos one*. 2017;12(8):0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>

8. Paul RM. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite. *Journal of Nuclear Materials*. 2020;543:152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>

9. Muzyka R, Kwoka M, Smędowski Ł, Dzię N, Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods. *New Carbon Materials*. 2017;32(1):15–20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1)

10. Smith RE, Kane JJ, Windes WE. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades. *Journal of Nuclear Materials*. 2021;545:152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>

11. Kondrasheva NK, Eremeeva AM, Nelkenbaum KS, Baulin OA, Dubovikov OA. Development of environmentally friendly diesel fuel. *Petroleum Science and Technology*. 2019;37(12):1478–1484. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1594285>

12. Li Chang, Chen Xi, Shen Liming, Bao Ningzhong. Revisiting the oxidation of graphite: reaction mechanism, chemical stability, and structure self-regulation. *ACS omega*. 2020;5(7):3397–3404. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03633>

13. Skákalová V, Kotrusz P, Jergel M, Susi T, Mittelberger A, Vretenár V. et al. Chemical oxidation of graphite: evolution of the structure and properties. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2018;122(1):929–935. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10912>

14. Bystrov MV, Yachikov IM, Portnova IV. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;966(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012019>

15. Behboudi F, Kakroudi MG, Vafa NP, Faraji M, Milani SS. Molten salt synthesis of in-situ TiC coating on graphite flakes. *Ceramics International*. 2021;47(6):8161–8168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.172>

16. Konno H, Kinomura T, Habazaki H, Aramata M. Formation of oxidation resistant graphite flakes by ultrathin silicone coating. *Surface and Coatings Technology*. 2005;194(1):24–30.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.04.079>
17. Bushuev VM, Bushuev MV. Method for manufacturing products from fine-grained siliconized graphite. Patent RF, no. 2685654; 2019.
18. Bushuev VM, Bushuev MV. Method for manufacturing products from ultrafine-grained siliconized graphite. Patent RF, no. 2685675; 2019.
19. Fujii K, Nakano J, Shindo M. Improvement of the oxidation resistance of a graphite material by compositionally gradient SiC/C layer. *Journal of Nuclear Materials*. 1993;203(1):10–16.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90424-W](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90424-W)
20. Zhu Qingshan, Qiu Xueliang, Ma Changwen. Oxidation resistant SiC coating for graphite materials. *Carbon*. 1999;37(9):1475–1484.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00010-X)
21. Wang Peipei, Li Hejun, Ren Xuanru, Yuan Ruimei, Hou Xianghui, Zhang Yulei. HfB₂-SiC-MoSi₂ oxidation resistance coating fabricated through in-situ synthesis for SiC coated C/C composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;722:69–76.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.008>
22. Dezellus O, Jacques S, Hodaj F, Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon. *Journal of Materials Science*. 2005;40(9-10):2307–2311.
<https://doi.org/10.1007/s10853-005-1950-7>
23. Shikunov SL, Kurlov VN. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices. *Technical Physics*. 2017;62(12):1869–1876.
<https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
24. Savchenko DV, Serdan AA, Morozov VA, Van Tendeloo G, Ionov SG. Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation. *New Carbon Materials*. 2012;27(1):12–18.
[https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(12\)60001-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(12)60001-8)
25. Bubnenkov IA, Koshelev Yul, Orekhov TV, Sorokin OYu. Development of fine-grained siliconized graphite with improved properties. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = Transactions on Chemistry and Chemical Technology*. 2012;55(6):12–16. (In Russ.)
26. Ershov AE, Shikunov SL, Kurlov VN. Method of calculating the phase composition of SiC–Si–C materials obtained by silicon infiltration of carbon matrices. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2017;87(6):888–895. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44512.1913>
27. Koshelev Yul, Bubnenkov IA, Shvetsov AA, Bardin NG, Sorokin OYu, Makarov NA. Siliconized graphite: physico-chemical basis of production and development prospects. Part 3. The influence of thermal effects and impurity elements in the silicon and the carbon material on the process of silicononane. *Tehnika i tehnologiya silikatov = Technique and Technology of Silicates*. 2017;24(3):11–15. (In Russ.)
28. Chunhe Tang, Jie Guan. Improvement in oxidation resistance of the nuclear graphite by reaction-coated SiC coating. *Journal of Nuclear Materials*. 1995;224(1):103–108.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(95)00031-3)
29. Grashchenkov DV, Isaeva NV, Solncev SS, Ermakova GV. *Ceramic composite material*. Patent RF, no. 2392250; 2010.
30. Talmy IG, Ashkenazi KJ. *Oxidation resistant coating for carbon*. Patent US, no. 6632762; 2003.
31. Jung JU, Myoung SW, Kang JH, Jeong-Pyo Kim. *Synthetic method for anti-oxidation ceramic coatings on graphite substrates*. Patent US, no. 20100310860; 2010.
32. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Yuhai, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite. *Ceramics International*. 2019;45(12):15366–15374.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>
33. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500°C in air. *Ceramics International*. 2020;46(5):6254–6261.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>
34. Liu Cheng-Lin, Zhao Qian-Wen, Sun Ze, Lu Gui-Min, Yu Jian-Guo. Analysis of magnesium droplets characteristics and separation performance in a magnesium electrolysis cell based on multiphysical modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018;43(11):5965–5976.
<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3148-8>
35. Haarberg GM. Trends and challenges for electrowinning of aluminium and magnesium from molten salt electrolytes. In: *TMS. 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. 2020. Cham: Springer; 2020, p. 1911–1922.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_176
36. Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1324–1336.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>
37. Lin Yingfei, Liu Tianlong, Wang Juan, Lu Jianning, Dong Xiaorong, Feng Xiaowei. Fabrication and oxidation resistance behavior of phosphate/borate impregnation for graphite. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125632.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125632>
38. Zeng Guisheng, Xie Gang, Yang Dajin, Wang Dajian, Zhang Xiongfei. Oxidation resistivity of boride coating of graphite anode sample. *Materials Chemistry and Physics*. 2006;95(1):183–187.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.053>
39. McKee DW. Borate treatment of carbon fibers and carbon/carbon composites for improved oxidation resistance. *Carbon*. 1986;24(6):737–741.
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(86\)90183-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(86)90183-1)
40. Feshchenko RYu, Eremin RN, Erokhina OO, Dydin VM. Phosphate solution wetting of graphite blocks for magnesium electrolysis to enhance their oxidation resistance. Part 1. *Tsvetnyye metally*. 2020;10:49–55.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>
41. De Tomas C, Suarez-Martinez I, Vallejos-Burgos F,



Lopez MJ, Kaneko K, Marks NA. Structural prediction of graphitization and porosity in carbide-derived carbons. *Carbon*. 2017;119:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.004>
42. Li Kejiang, Zhang Hang, Li Guangyue, Zhang

Jianliang, Bouhadja M, Liu Zhengjian, et al. ReaxFF molecular dynamics simulation for the graphitization of amorphous carbon: a parametric study. *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2018;14(5):2322–2331. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b01296>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фещенко Роман Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
✉ e-mail: feschenko_ryu@pers.spmi.ru

Roman Yu. Feshchenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Metallurgy Department,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: feschenko_ryu@pers.spmi.ru

Ерохина Ольга Олеговна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s205080@stud.spmi.ru

Olga O. Erokhina,
Postgraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s205080@stud.spmi.ru

Еремин Роман Николаевич,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s175081@stud.spmi.ru

Roman N. Eremin,
Postgraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s175081@stud.spmi.ru

Матыльский Бронислав Эдуардович,
магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s202768@stud.spmi.ru

Bronislav E. Matylskiy,
Undergraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s202768@stud.spmi.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; одобрена после рецензирования 27.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

Information about the article

The article was submitted 22.04.2021; approved after reviewing 27.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.