



Научная статья

УДК 544.6

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>

Обоснование термофизического воздействия на электродную массу для получения равномерной структуры электродов из игольчатого кокса для руднотермических печей

В.Ю. Бажин^{1✉}, К.А. Крылов², Ф.Ю. Шариков³¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель – разработка технологии получения электродной массы из игольчатого кокса при термофизическом воздействии в контуре экструдера для получения углеродистых электродов с заданной структурой и свойствами для руднотермических печей. Для изучения свойств и составов электродных масс и электродов применялись порошковая рентгеновская дифрактометрия, электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, калориметрия. Для оценки поведения электродов при нагреве в расплаве использовались методы математического и статистического анализа. Обработка данных выполнялась с использованием стандартных программных пакетов MSOffice. Эксперименты с углеродистыми материалами проводились в калориметрической лаборатории на базе Научного центра «Проблемы переработки минеральных и техногенных ресурсов» и кафедры металлургии Санкт-Петербургского горного университета с использованием разработанного и запатентованного прототипа экструдера. Определены и научно обоснованы условия и технологические параметры процесса обработки электродных масс (скорости экструзии и потока электродной массы, давление, скорость нагрева в заданном интервале температур для получения устойчивых структурных показателей электрода). Предлагаемый авторами способ термофизической постобработки электродной массы через специальный экструдер в интервале температур 550–620°C и давлении на матрицу 60–80 МПа обеспечивает получение равномерно направленной структуры игольчатого кокса со средней толщиной игл 12–20 нм и длиной игольчатых фаз 5–10 мм, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа. Проведены испытания образцов электродов в расплаве печи в интервале температур 1500–1700°C. Полученные результаты подтверждают устойчивые показатели коэффициента термического расширения ($0,3 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$), удельного электросопротивления (4,5–6,0 мкОм·м), что проявляется в снижении сублимации электрода, низких потерях общей массы на торце электрода, уменьшении степени окисления и количества разрушений его боковой поверхности. При полученной структуре электродов обеспечиваются устойчивые показатели тепло- и электропроводности наряду с высокими значениями теплоемкости, не уступающими показателям электродов и электродных масс импортного производства.

Ключевые слова: игольчатый кокс, электрод, руднотермическая печь, структура, трещиноустойчивость, электропроводность

Для цитирования: Бажин В.Ю., Крылов К.А., Шариков Ф.Ю. Обоснование термофизического воздействия на электродную массу для получения равномерной структуры электродов из игольчатого кокса для руднотермических печей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 161–173. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>.

METALLURGY

Original article

Substantiation of thermophysical action over electrode paste to achieve an even structure of electrodes of needle coke for thermal furnaces

Vladimir Yu. Bazhin^{1✉}, Kirill A. Krylov², Felix Yu. Sharikov³¹⁻³St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

© Бажин В.Ю., Крылов К.А., Шариков Ф.Ю., 2023

<https://ipolytech.ru>

161

Abstract. The aim was to develop a procedure for obtaining an electrode paste of needle coke in case of thermophysical action in the extruder circuit to produce graphitized carbon electrodes with the required structure and properties for thermal furnaces. To study the properties and composition of electrode pastes and electrodes, X-ray powder diffraction, electron microscopy, infrared spectroscopy, and calorimetry analysis were used. To evaluate the electrode behavior upon its heating in a melt, mathematical and statistical analysis was used. The data were processed using standard MS Office programs. Experiments with graphitized carbon materials were conducted in a calorimetric laboratory at the Scientific Center for Problems of Processing Mineral and Man-Made Resources, Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University (Russia), using a developed proprietary prototype of the extruder. The conditions and technological parameters for processing electrode pastes were defined and substantiated (rate of extrusion and electrode paste flow, pressure, and heating rate within the defined temperature range to achieve stable structural indicators of electrodes). According to XRD data, the proposed method of thermophysical processing of an electrode paste via a special extruder within 550–620°C and a die pressure of 60–80 MPa provides an evenly directed structure of needle coke with an average needle thickness of 12–20 nm and a length of needle phases of 5–10 μm. The behavior of electrode samples was examined in the furnace melt within 1500–1700°C. The obtained stable levels of the thermal-expansion coefficient ($0.3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) and specific electrical resistance (4.5–6.0 μmOhm·m) were manifested in reduced electrode sublimation, low losses of overall weight at the electrode end, decreased oxidation, and reduced damage on its side. The proposed electrode structure ensures stable heat and electrical conductivity, as well as high heat capacity, which levels are equivalent to those of imported electrodes and electrode pastes.

Keywords: needle coke, electrode, thermal furnace, structure, crack resistance, electrical conductivity

For citation: Bazhin V.Yu., Krylov K.A., Sharikov F.Yu. Substantiation of thermophysical action over electrode paste to achieve an even structure of electrodes of needle coke for thermal furnaces. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):161-173. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>.

ВВЕДЕНИЕ

Электроды как расходный продукт переработки игольчатого кокса и нефтяного кокса подвергаются технологическому обжигу и графитации с целью получения свойств и качеств, необходимых для высокой проводимости тока, химической и механической стойкости при дальнейшей эксплуатации в печах [1, 2]. Заданная структура, как и состав электродов, обеспечивает устойчивую работу электрических печей, повышает производительность и снижает энергопотребление [3, 4]. Повышение энергетической эффективности химико-металлургических производств является первостепенной задачей промышленности любого государства наряду с получением продукции высокого качества [5, 6]. В существующих технологиях производства металлов в руднотермических печах существует проблема эксплуатации электродов из игольчатого кокса, связанная непосредственно с повышением срока их службы [7, 8]. В некоторых случаях на руднотермических печах по этим причинам при снижении производительности процесса увеличивается расход электроэнергии на 20–30% [9]. Так, во время нагрева шихтовых материалов и их плавления происходит разрушение электродов, которое проявляется в виде образования микротрещин, выгорания и осыпания боковой

поверхности в результате химической эрозии, механического износа торцевых частей на протяжении всего периода эксплуатации печи [10, 11].

Спрос на продукцию со стороны отечественных и мировых производителей графитированных электродов очень высок, потребность составляет более 150 тыс. т/год. Мировые цены на игольчатый кокс в 2021–2022 гг. повысились, что привело к росту цен на электроды на 25–27% [12]. Таким образом, на сегодняшний день в России отсутствует промышленное производство игольчатого кокса на электродных заводах [13, 14], исследования в этой области проводятся в недостаточной степени.

Попытки создания новых технологий в рамках импортозамещения, основанных на использовании новых типов катализаторов и различных органических добавок, а также изменение режимов полукоксования без дополнительного физического воздействия на последней стадии не привели к качественному улучшению свойств отечественных электродных масс на основе игольчатого кокса [15, 16]. В настоящее время при наличии в составе группы компаний «ЭНЕРГОПРОМ» трех электродных заводов (Новочеркасский завод – НЭЗ, Челябинский завод – ЧЭЗ, Новосибирский завод – НЭЗ) отсутствуют технологии

производства игольчатого кокса – основного компонента углеграфитового электрода. Для металлургических печей используются электроды, выполненные из импортного игольчатого кокса, поставляемого компаниями США, Японии и Китая. Передовые технологии производства высококачественного электродного кокса связаны с компаниями из США [17, 18]. Данные аналитического исследования подтверждают, что для большинства импортных электродных масс из игольчатого кокса при однородной толщине частиц характерно их значительное отклонение по длине иглообразных фаз, что может быть обусловлено несоответствием температуры обжига во всем объеме электродной массы и в отдельно взятой грануле кокса [19].

В свою очередь это приводит к появлению неравномерной структуры самого электрода с образованием зон с неоднородными полостями и дефектами. Существующие отечественные технологии, которые разрабатываются в рамках программы импортозамещения, не обеспечивают необходимую структуру и свойства электродных масс и самих

электродов [20]. Научно-технический интерес представляет разработка дополнительной стадии в виде термофизического воздействия на структуру и свойства углеграфитовых материалов и является актуальным обоснованием технологических основ в период формирования структуры на стадии обработки «зеленых масс» во вращающихся печах [21, 22] и в периодах полукоксования при последующей экструзии жидко-твердой массы игольчатого кокса при определении рациональных технологических параметров в заданном интервале [23].

На рис. 1 показана зависимость увеличения длины частиц кокса (зародышей иглообразных фаз) в зависимости от температуры обжига во вращающейся печи (материалы авторов).

Целью исследования является получение высококачественных структурированных электродов для металлургических печей. Для выполнения поставленной цели необходимо решить задачи, связанные с повышением электропроводности, химической и механической стойкости при улучшении структуры.

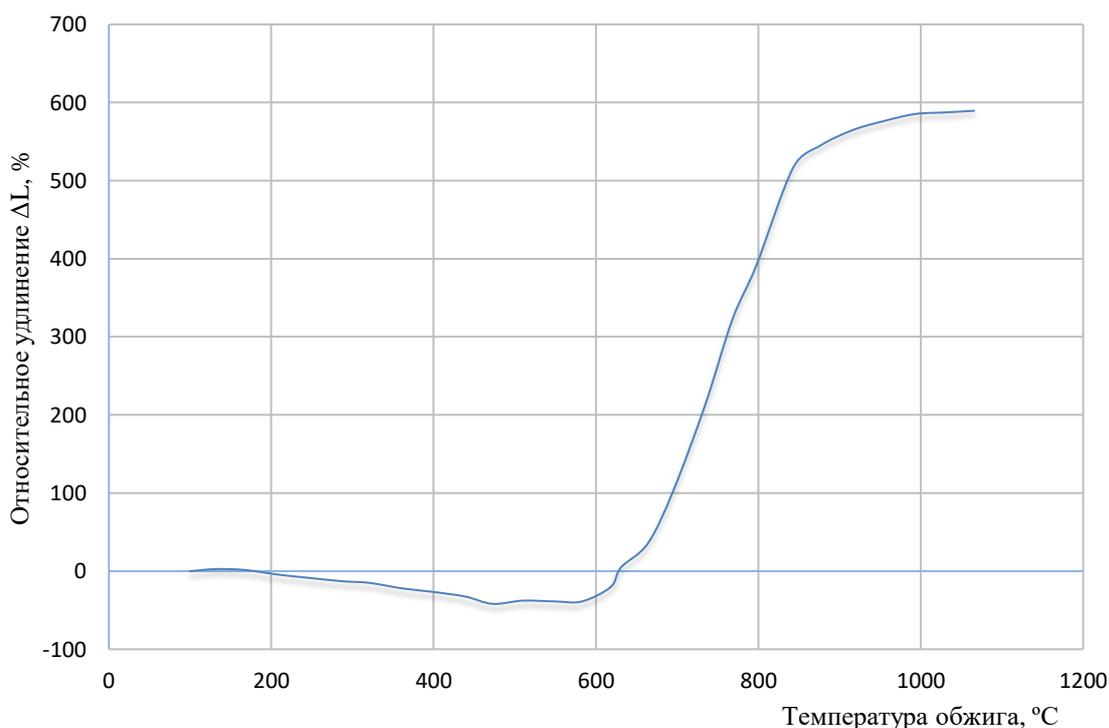


Рис. 1. Зависимость величины относительного удлинения частиц кокса в зависимости от температуры обжига
Fig. 1. The value of coke grain relative elongation vs calcination temperature

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительная обработка «зеленой» электродной массы во вращательных печах не обеспечивает необходимой структуры кокса, и, согласно данным рентгеноструктурного анализа, в ее образцах присутствуют сгустки связующего пека и зародыши игл различной длины и толщины [24, 25]. Межплоскостные расстояния между иглами также имеют различные расстояния. С другой стороны, во время обжига решаются задачи по снижению содержания серы, удалению металлосодержащих фаз, внешней и внутренней влаги за счет перемешивания кокса в печи, что доказывает необходимость проведения данной технологической операции.

Для апробации предлагаемой технологии производства электродных масс из игольчатого кокса был разработан прототип экструдера (рис. 2 – материалы авторов) для физического воздействия на электродную массу [26]. Предварительные этапы работы показали возможность применения экструдера для прессования шихты электродной массы.

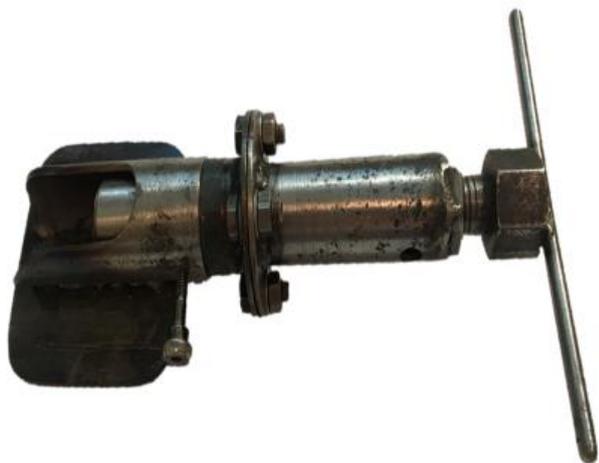


Рис. 2. Часть экструдера
Fig. 2. Part of an extruder

Для решения вопроса по получению упорядоченной структуры для электродной массы из игольчатого кокса предложен способ производства игольчатого кокса с упорядоченной структурой, а также разработана и запатентована опытно-промышленная установ-

ка по производству игольчатого кокса, принцип работы которой позволяет проводить одновременно термическую (коксование) и физическую (экструзия под давлением) обработку предварительно обожженной электродной массы для ее последующего структурирования и придания необходимых свойств, соответствующих игольчатому коксу [27]. На рис. 3 представлена схема промышленного экструдера и часть его узлов для реализации получения игольчатого кокса при нагреве и одновременно наложенном давлении и перемешивании массы с получением игл заданной размерности с высокой плотностью упаковки.

В установку для получения игольчатого кокса, основным исполнительным органом которой является экструдер с движущимся шнеком для комплексного воздействия на обожженную электродную массу, входят следующие конструктивные элементы (см. рис. 3): 1 – бункер; 2 – нагревательная камера; 3 – кран-клапан; 4 – электродвигатель транспортирующего устройства; 5 – транспортирующее устройство; 6 – корпус шнека; 7 – шнек; 8 – упорно-радиальный подшипник; 9 – электродвигатель корпуса шнека; 10 – формующая насадка; 11 – формующие каналы; 12 – патрубок; 13 – двухременная передача; 14 – электродвигатель шнека; 15 – среднее основание; 16 – нижнее основание; 17 – верхнее основание; 18 – центробежный вентилятор; 19 – одновременная передача; 20 – воздухораспределительная система; 21 – воздуховыпускные каналы.

Экструзионная установка включает в себя корпус, формующую насадку на торце корпуса, установленный внутри корпуса шнек, электропривод для вращения шнека. При этом установка состоит из верхней, средней, нижней секций, которые соединены между собой с возможностью съема. К верхнему основанию крепится нагревательная камера с возможностью съема, в верхней стенке нагревательной камеры выполнены отверстия, в первое жестко закреплен переходник, к которому крепится с возможностью съема бункер, а в другое с возможностью съема установлен кран-клапан.

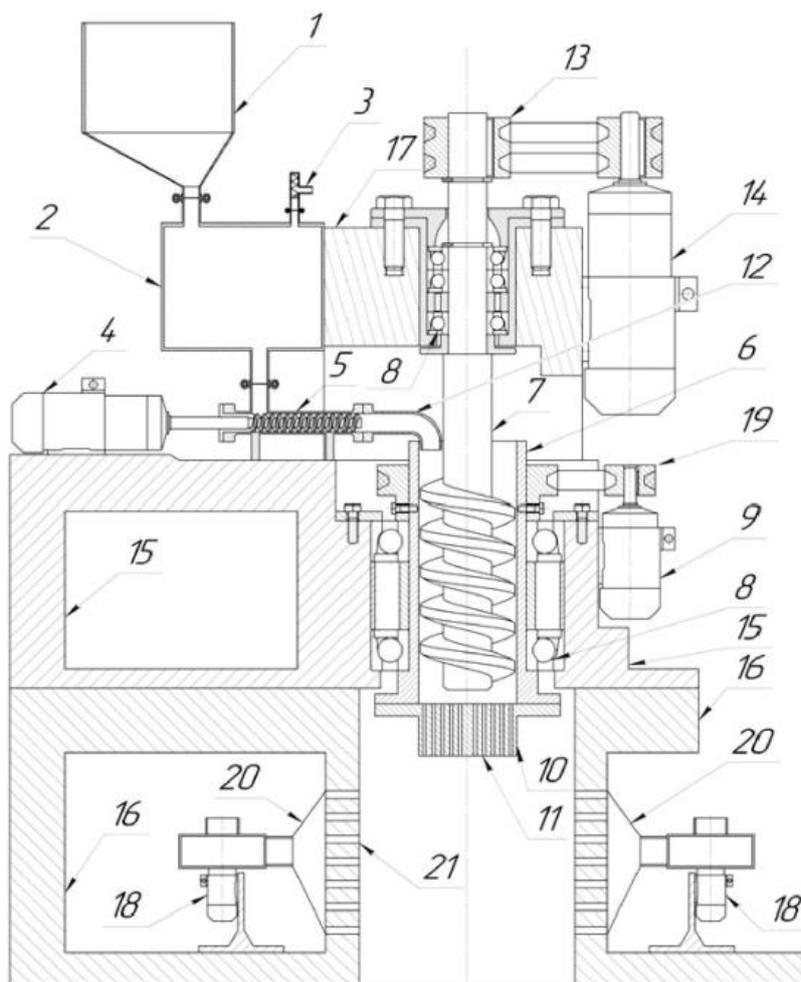


Рис. 3. Схема установки для производства игольчатого кокса [27]
Fig. 3. Design of a needle coke production unit [27]

В нижней стенке нагревательной камеры выполнено отверстие, в которое установлен переходник, который соединен с возможностью съема транспортирующего устройства, соединенного с одного конца с электродвигателем транспортирующего устройства, а другой стороны – с патрубком, конец которого изогнут и закреплен сверху в корпус шнека, установленного в жестко закрепленных в среднем основании упорнорadiaльных подшипников, а корпус шнека через одноремennую передачу соединен с электродвигателем корпуса шнека. После нагрева в бункере до температуры полукоксования 450–550°C [28] обожженная электродная масса может выпускаться направленно через насадку при выключенном шнеке под давлением плунжера 10–100 Па, придавая различную скорость выхода электродной массы из формующей насадки,

которая крепится снизу к корпусу шнека с возможностью съема. В насадке выполнены формующие каналы круглого сечения. Здесь корпус шнека также устанавливается в упорнорadiaльных подшипниках, которые жестко закреплены в верхнем основании, а шнек через двухременную передачу соединяется с собственным электродвигателем. В боковых стенках средней и нижней секций, которые находятся друг напротив друга, не менее двух рядов воздуховыпускных каналов, внутри нижнего основания крепятся центробежные вентиляторы, сопла которых соединены с воздухом распределительной системой, установленной напротив воздуховыпускных каналов.

Подготовленная во вращающейся обжиговой печи необработанная масса при ее исходной температуре 150–250°C направляется в бункер 1 разработанной установки, откуда

будет осуществляться питание экструдера. Вся загруженная в бункер 1 масса самотеком транспортируется в нагревательную камеру 2, где производится ее нагрев до температуры коксования 550–620°C. Из нагревательной камеры 2 производится сброс образующегося газа через кран-клапан 3. Из нагревательной камеры 2 материал транспортирующим устройством 5, которое приводится в движение электродвигателем 4, перемещается в шнек 7, который транспортирует материал к формующей насадке 10 и выдавливается через формующие каналы 11. Корпус шнека 6 вращается в упорно-радиальных подшипниках 8 вместе с формующей насадкой 10 и шнеком 7. Корпус шнека 6 вращается электродвигателем корпуса шнека 9, который передает вращение через одноремennую передачу 19. За счет вращения корпуса шнека 6 и формующей насадки 10, материал, выдавливаясь из формующих каналов 11, отклоняется к внутренним стенкам нижнего основания 16, вследствие чего дополнительно вытягивается. Шнек 7 вращается относительно верхнего основания 17 в упорно-радиальных подшипниках 8. Шнек 7 приводится в движение электродвигателем шнека 14 и передающей вращение двухременной передачей 13. Расположенные на нижнем основании 16 центробежные вентиляторы 18 нагнетают воздух в установку через воздуховыпускную систему 20 по воздуховыпускным каналам 21, при этом происходит охлаждение продукта. Данные вентиляторы нагнетают воздух в воздуховыпускные каналы, которые распределяют поток воздуха. Воздуховыпускные каналы 21 расположены по касательной во внутренней стенке нижнего основания 16 в зоне разгрузки продукта, что позволяет создать в зоне разгрузки вихревой поток, который не только охлаждает продукт, но и обеспечивает переплетение частиц игольчатого кокса между собой с образованием в результате более крупного готового продукта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования образцов электродной массы на различных стадиях обработки проводили методом сканирующей электронной

микроскопии (SEM от англ. Scanning Electron Microscope), которые были выполнены на Tescan Vega 3, оснащенном детекторами вторичных электронов (SE от англ. Secondary Electron) и обратно рассеянных электронов (BSE от англ. Backscattered Electron) сканирующем электронном микроскопе (оснащенном энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS от англ. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)). Данный прибор использовался для изучения морфологии и композиционного распределения элементов поверхности углеродной электродной массы [29–31]. SEM-изображения были получены при 10 кВ и 20 мА с использованием детектора SE для низковакуумной SEM (UVD от англ. Ultra Variable-Pressure) и детектора BSE. В работах [32, 33] была изучена стадия технологического процесса подготовки электродной массы и созданы математические модели ее обработки во вращающихся печах. На рис. 4 (материалы авторов) приведены снимки исходной микроструктуры зеленой и обожженной массы в трубчатой вращающейся печи, на которой видны зародыши игольчатых фаз различного размера.

В разработанной конструкции экструдера была проведена обработка 5 образцов электродной массы при различных технологических параметрах. В результате проведенных опытов при заданных параметрах (температуре коксования, давлении на матрицу, скорости вращения шнека) была получена структурированная электродная масса. Рентгеноструктурный анализ образцов обработанной массы показал наилучшие результаты и структуру матрицы в интервале температур 550–620°C при давлении 60–80 МПа. Заданные условия обеспечивают получение равномерно направленной структуры игольчатого кокса [34] со средним размером 12–20 нм и длиной игольчатых фаз 5–10 мм по всему объему электродной массы. На рис. 5 (материалы авторов) показаны типичные структуры для одного из образцов при различных вариантах работы экструдера.

В исходном состоянии (см. рис. 4 а) зародыши игольчатых фаз расположены неупорядоченно, имеются участки с большими

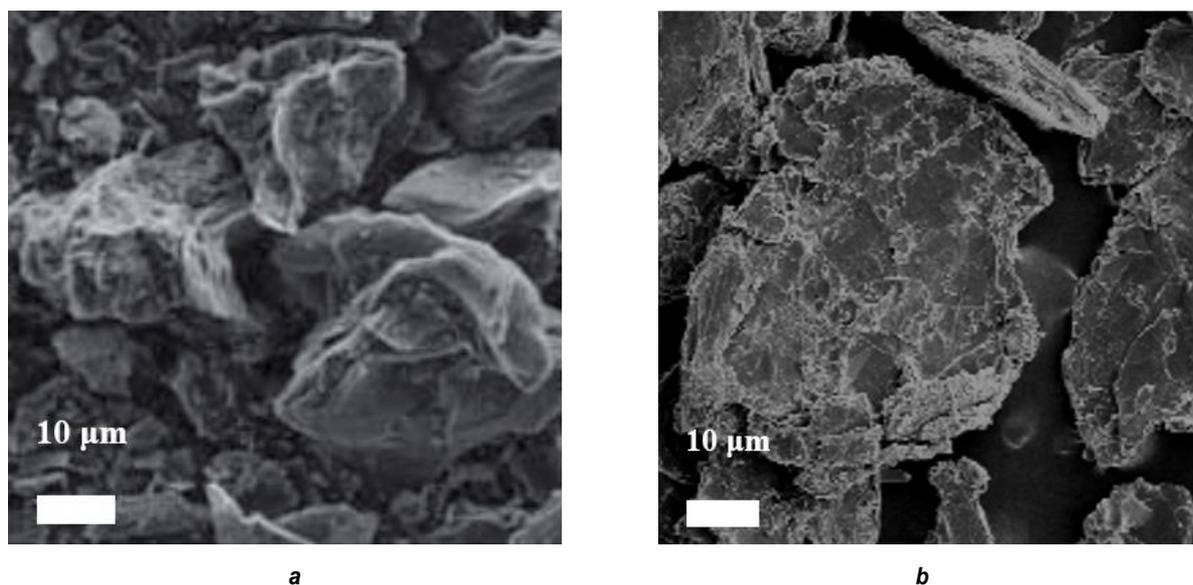


Рис. 4. Результаты SEM-анализа углеграфитовой электродной массы: а – «зеленая» масса перед загрузкой в печь; б – обожженная масса после 1000–1200 °С
Fig. 4. Results of carbon graphite electrode mass SEM analysis: a – "Green" mass before loading into the furnace; b – mass roasted at 1000-1200 °C

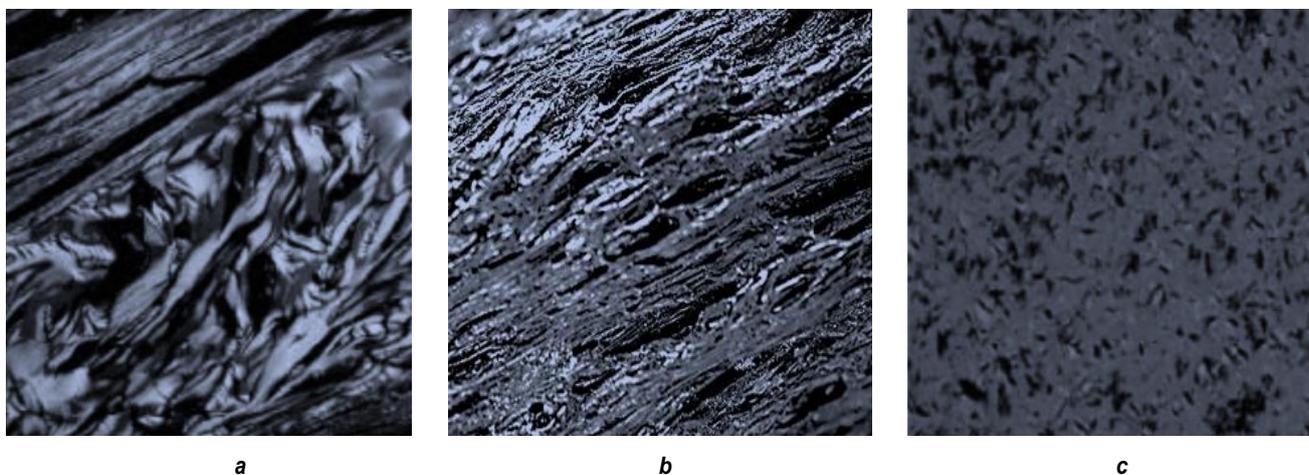


Рис. 5. Типичные структуры для одного из образцов при различных вариантах работы экструдера; а – исходное состояние после обжига во вращающейся печи; б – после нагрева в экструдере при выключенном шнеке; с – структура электродной массы после полной обработки в экструдере
Fig. 5. Typical structures for one of the samples under different operating conditions of the extruder; a – initial state after calcination in the rotary kiln; b – state after heating in the extruder with the turned off screw feed; c – electrode mass structure after complete processing in the extruder

межплоскостными расстояниями. С другой стороны, после экструдера с выключенным шнеком (рис. 4 б) видно, что при наложенном давлении в режиме коксования (550–750 °С) формируется направленная структура электродной массы с плотной упаковкой из игл, минимальным расстоянием между иглами. При включенном шнеке (рис. 4 с) и при заданных скоростях экструзии размеры игл

становятся практически одинаковыми, и образуется равномерная структура игольчатого кокса. Таким образом, при помощи термофизического воздействия удалось улучшить структуру игольчатого кокса. Эти факторы влияют на показатели термического расширения и потенциальное качество электрода.

Полученные образцы углеграфитовых материалов (УГМ) после формовки и обжига

выдерживали в расплаве в температурном интервале от 700–1500°C, затем исследовали их структуру и свойства.

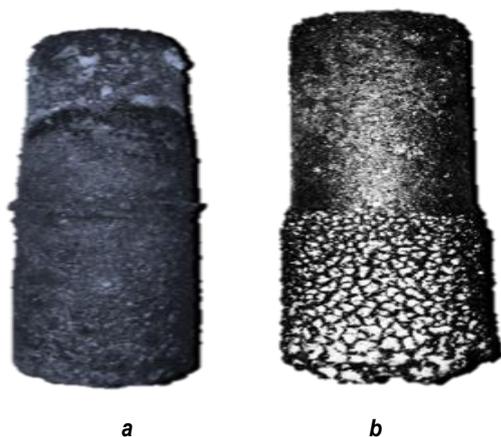


Рис. 6. Внешний вид образцов сформированных из структурированной электродной массы (а) и из стандартного углеграфитового материала (b) после выдержки в расплаве

Fig. 6. Exterior of samples formed from a structured electrode mass (a) and from a standard carbon graphite material (b) after the exposure to the melt

Из полученной после термофизического структурирования электродной массы из игольчатого кокса производили образцы и помещали их в расплав при близких к промышленным условиям температурах 1400–1800°C° в течение 24 ч. По сравнению со стандарт-

ными образцами электроды из структурированной массы имеют меньше разрушений, меньшее окисление поверхности и сохраняют заданную первоначально форму (рис. 6 – материалы авторов).

Для полученных образцов с наилучшими структурными показателями проводили тестирование для определения значений удельной электропроводности, предела прочности объемной плотности и коэффициента линейного термического расширения. В таблице представлены результаты испытаний для лучшего образца УГМ из структурированной массы по сравнению со стандартным образцом, вырезанным из углеграфитового электрода на основе игольчатого кокса российского производства (марки «Энергопром»).

По показателям образцы из структурированной УГМ не уступают стандартным образцам⁴. В этой связи предлагается ввод новой стадии операции в рамках цикла производства углеграфитовых электродов – термофизической обработки УГМ после обжига, обеспечивающей качественное улучшение структуры электродной массы в контуре экструдера – установки для производства игольчатого кокса. На стандартной технологической схеме (рис. 7 – материалы авторов) эта операция выделена зеленым цветом.

Качественные характеристики электродов
 Quality characteristics of electrodes

Наименование показателя	Углеграфитовый материал	
	стандартный	структурированный
Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	5,0	7,0
Предел прочности при изгибе, МПа	16,0	12,0
Объемная плотность, г/см ³	1,75	1,60
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур от 20 до 520°C, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	1,4	1,7

⁴Электродная масса // АО «ЭПМ-МЕНЕДЖМЕНТ» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.el6.ru/ru/klientam/produkcziya-i-texnologii/produkcziya/uglerodnaya-massa/> (28.03.2022).



Рис. 7. Модернизированный цикл производства углеграфитовых электродов
Fig. 7. Modernized carbon graphite electrode production cycle

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования доказывают целесообразность ввода операции термического и физического воздействия на электродную массу после обжига во вращающейся печи. Оригинальная конструкция установки повышает производительность и позволяет получать высококачественный игольчатый кокс с заданным размером иглообразных фаз (длины и толщины), который может применяться в производстве крупногабаритных графитированных электродов для электродуговых плавильных печей.

Проведенные исследования с электродными массами на разработанном экструдере показали, что при оптимально выбранных параметрах (температуре коксования, давлении на матрицу, скорости вращения шнека) получается равномерно структурированная масса

игольчатого кокса:

- при давлении 50–70 Па обеспечивается устойчивое формирование иглообразных фаз;

- в интервале полукоксования происходит устойчивое разделение твердых иглообразных фаз и пекового остатка;

- при скорости вращения шнека 15–20 об/мин достигается устойчивая длина игл 10–155 мм по всему объему;

- при температуре на выходе из экструдера наблюдается срастание иглообразных фаз посредством тонких прослоек пека.

Таким образом, предлагаемый вариант переработки «зеленой» массы позволяет получить образцы электродов, которые соответствуют показателям в соответствии со стандартом качества ИСО 2000.

Список источников

1. Мартынов С.А., Масько О.Н., Федоров С.Н. Перспективные системы управления энергетическим режимом рудно-термических печей // Цветные металлы. 2022. № 4. С. 87–94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
2. Feshchenko R.Yu., Feshchenko E.A., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Analysis of the anode paste charge composition // Metallurgist. 2020. Vol. 64. № 7. С. 615–622. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01037-1>.
3. Yoon Juhee, Moon Seongbak, Ha Son, Lim Hyung-Kyu, Jin Hyoung-Joon, Yun Young Soo. Nanofinement effect of nanoporous carbon electrodes for ionic liquid-based aluminum metal anode // Journal of Energy Chemistry. 2022. Vol. 74. P. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.jchem.2022.06.048>.
4. Zhang Mingqiang, Liao Siyang, Xu Jian, Li Lingfang, Chen Yixuan, Zhu Xinchun, System static voltage stability analysis considering load characteristics of electrolytic aluminum // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.162>.
5. Shestakov A.K., Sadykov R.M., Petrov P.A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell // E3S Web Conferences. 2021. Vol. 266. P. 09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002>.
6. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2022. С. 1–17. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
7. Опалев А.С., Алексеева С.А. Методическое обоснование выбора оптимальных режимов работы оборудования схемы стадийного вывода концентрата при обогащении железных руд // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 593–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>.
8. Шестаков А.К., Петров П.А., Николаев М.Ю. Автоматическая система обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода на основе технического зрения и нейронной сети // Металлург. 2022. № 10. С. 105–112. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_105.
9. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R., Khosravi A. Effects of TiO₂/SiC/SiO₂ coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 420. P. 127340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127340>.
10. Горланов Е.С., Кавалла П., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 42–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>.
11. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 36–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>.
12. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслав Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>.
13. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. P. 848–857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
14. Габдулхаков Р.Р., Рудко В.А., Ефимов И.И., Спекторук А.А. Оценка качества игольчатого кокса для производства графитированных электродов металлургических печей // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 46–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.05>.
15. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Pyagay I.N. Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review) // Fuel. 2022. Vol. 310. Part A. P. 122265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122265>.
16. Mondal S., Yadav A., Pandey V., Sugumaran V., Bagai R., Kumar R., et al. Dissecting the cohesiveness among aromatics, saturates and structural features of aromatics towards needle coke generation in DCU from clarified oil by analytical techniques // Fuel. 2021. Vol. 304. P. 121459. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121459>.
17. Ying Liu, Dengpeng Chai, Wei Wang, Dongsheng Li, Junwei Wang, Yudong Liang, et al. Influences of heat treatment on the oxidation and corrosion behavior of Cu–Ni–Fe inert anodes for aluminium electrolysis // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 832. P. 154848. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154848>.
18. Ouzilleau P., Gheribi A.E., Chartrand P. Prediction of CO₂/CO formation from the (primary) anode process in aluminium electrolysis using an electrothermodynamic model (for coke crystallites) // Electrochimica Acta. 2018. Vol. 259. P. 916–929. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.175>.
19. Sharikov F.Y., Sharikov Y.V. The study of petroleum coke thermal stability and its further modification – experimental approach and modelling // WJERT. 2020. Vol. 6. Iss. 3. P. 113–126. [Электронный ресурс]. URL: https://www.wjert.org/admin/assets/article_issue/38042020/1588149831.pdf (12.03.2022).
20. Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Еремин Р.Н., Матильский Б.Э. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 380–390. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>.
21. Hu Wen-jia, Wang Qi, Zhao Xue-fei, Yang Song-tao, Wu Hu-lin, Zhang Song, et al. Relevance between various phenomena during coking coal carbonization. Part 3: Understanding the properties of the plastic layer during coal carbonization // Fuel. 2021. Vol. 292. P. 120371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120371>.
22. Liu Jie, Shi Xue-mei, Cui Lou-wei, Fan Xiao-yong, Shi Jun-he, Hu Xian, et al. Effect of raw material composition on the structure of needle coke // Journal of Fuel Chemistry

and Technology. 2021. Vol. 49. Iss. 4. P. 546–553. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60026-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60026-9).

23. Li Mingfeng, Wang Yanjun, Yang Shanglu, Tao Wu, Zhang Guotao. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designed Newton ring electrode // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 948–959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.

24. Ismagilov Z.R., Sozinov S.A., Popova A.N., Zaporin V.P. Structural analysis of needle coke // *Coke and Chemistry*. 2019. Vol. 62. Iss. 4. P. 135–142. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19040021>.

25. Cheng Junxia, Lu Zhenjie, Zhao Xuefei, Chen Xingxing, Liu Yuhong. Green needle coke-derived porous carbon for high-performance symmetric supercapacitor // *Journal of Power Sources*. 2021. Vol. 494. P. 229770. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229770>.

26. Gutiérrez E., Salazar E., Salinas A., Deaquino R., Ponce A., Yacamán M., et al. Texture, microstructure and mechanical properties of AA7075-graphite composites produced through mechanical alloying and hot-extrusion // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 296. P. 127323. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127323>.

27. Пат. № 2784238, Российская Федерация, С10В 55/00. Установка для получения игольчатого кокса / В.Ю. Бажин, И.И. Белоглазов, Е.С. Ильин, В.Б. Кусков, К.А. Крылов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 31.03.2022; опубл. 23.11.2022. Бюл. № 33.

28. Yumeng Yang, Jiangzhong Liu, Mingyi Chen. Superfine comminution characteristics of low-rank coal pyrolysis semi-cokes and evolution of fragmentation fractal dimension // *Fuel*. 2022. Vol. 325. P. 124991.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124991>.

29. Bangaru S.S., Wang Chao, Zhou Xu, Hassan Marwa. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 144. P. 104602. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104602>.

30. Nohl J.F., Farr N.T.H., Sun Yige, Hughes G.M., Cussen S.A., Rodenburg C. Low-voltage SEM of air-sensitive powders: from sample preparation to micro/nano analysis with secondary electron hyperspectral imaging // *Micron*. 2022. Vol. 156. P. 103234. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103234>.

31. Asadi P., Beckingham L.E. Intelligent framework for mineral segmentation and fluid-accessible surface area analysis in scanning electron microscopy // *Applied Geochemistry*. 2022. Vol. 143. P. 105387. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105387>.

32. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu., Krylov, K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 55. P. 711–719. <https://doi.org/10.1134/S0040579521030192>.

33. Sharikov F.Yu., Sharikov Yu.V., Krylov K.A. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. No. 23. P. 2904–2912.

34. Xu Xian, Cui Louwei, Shi Junhe, Liu Jiaojiao, Zhu Yonghong, Tian Yafei, et al. Effects of co-carbonization of medium and low temperature refined pitch and high temperature refined pitch on the structure and properties of needle coke // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023. Vol. 169. P. 105783. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783>.

References

1. Martynov S.A., Masko O.N., Fedorov S.N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Chernye Metally*. 2022;4:87-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
2. Feshchenko R.Yu., Feshchenko E.A., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Analysis of the anode paste charge composition. *Metallurgist*. 2020;64(7):615-622. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01037-1>.
3. Yoon Juhee, Moon Seongbak, Ha Son, Lim Hyung-Kyu, Jin Hyoung-Joon, Yun Young Soo. Nanoconfinement effect of nanoporous carbon electrodes for ionic liquid-based aluminum metal anode. *Journal of Energy Chemistry*. 2022;74:121-127. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.06.048>.
4. Zhang Mingqiang, Liao Siyang, Xu Jian, Li Lingfang, Chen Yixuan, Zhu Xinchun, System static voltage stability analysis considering load characteristics of electrolytic aluminum. *Energy Reports*. 2022;8:1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.162>.
5. Shestakov A.K., Sadykov R.M., Petrov P.A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell. In: *E3S Web Conferences*. 2021;266:09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002>.
6. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;1-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
7. Opalev A.S., Alekseeva S.A. Methodological substantiation of the choice for optimal modes of equipment operation during the stage-wise concentrate removal in iron ores beneficiation. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:593-602. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>.
8. Shestakov A.K., Petrov P.A., Nikolaev M.Yu. Automatic system for detecting visible outliers in electrolysis shop of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022;10:105-112. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_105.
9. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R.,

- Khosravi A. Effects of TiO₂/SiC/SiO₂ coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods. *Surface and Coatings Technology*. 2021;420:127340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127340>.
10. Gorlanov E.S., Kavalla R., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Promising development trends. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>.
11. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 1. Conventional development trends. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>.
12. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;244:428-438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>.
13. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvannd H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7:848-857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
14. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Efimov I.I., Spektoruk A.A. Quality assessment of needle coke used in the production of graphite electrodes for metallurgical furnaces. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:46-56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.05>.
15. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Pyagay I.N. Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review). *Fuel*. 2022;310(A):122265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122265>.
16. Mondal S., Yadav A., Pandey V., Sugumaran V., Bagai R., Kumar R, et al. Dissecting the cohesiveness among aromatics, saturates and structural features of aromatics towards needle coke generation in DCU from clarified oil by analytical techniques. *Fuel*. 2021;304:121459. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121459>.
17. Ying Liu, Dengpeng Chai, Wei Wang, Dongsheng Li, Junwei Wang, Yudong Liang, et al. Influences of heat treatment on the oxidation and corrosion behavior of Cu–Ni–Fe inert anodes for aluminium electrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;832:154848. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154848>.
18. Ouzilleau P., Gheribi A.E., Chartrand P. Prediction of CO₂/CO formation from the (primary) anode process in aluminium electrolysis using an electrothermodynamic model (for coke crystallites). *Electrochimica Acta*. 2018;259:916-929. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.175>.
19. Sharikov F.Y., Sharikov Y.V. The study of petroleum coke thermal stability and its further modification – experimental approach and modelling. *WJERT*. 2020;6(3):113-126. Available from: https://www.wjert.org/admin/assets/article_issue/38042020/1588149831.pdf [Accessed 12th March 2022].
20. Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Eremin R.N., Matyl'skiy B.E. Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):380-390. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>.
21. Hu Wen-jia, Wang Qi, Zhao Xue-fei, Yang Song-tao, Wu Hu-lin, Zhang Song, et al. Relevance between various phenomena during coking coal carbonization. Part 3: Understanding the properties of the plastic layer during coal carbonization. *Fuel*. 2021;292:120371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120371>.
22. Liu Jie, Shi Xue-mei, Cui Lou-wei, Fan Xiao-yong, Shi Jun-he, Hu Xian, et al. Effect of raw material composition on the structure of needle coke. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2021;49(4):546-553. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60026-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60026-9).
23. Li Mingfeng, Wang Yanjun, Yang Shanglu, Tao Wu, Zhang Guotao. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designated Newton ring electrode. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;64:948-959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.
24. Ismagilov Z.R., Sozinov S.A., Popova A.N., Zaporin V.P. Structural analysis of needle coke. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):135-142. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19040021>.
25. Cheng Junxia, Lu Zhenjie, Zhao Xuefei, Chen Xingxing, Liu Yuhong. Green needle coke-derived porous carbon for high-performance symmetric supercapacitor. *Journal of Power Sources*. 2021;494:229770. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229770>.
26. Gutiérrez E., Salazar E., Salinas A., Deaquino R., Ponce A., Yacaman M., et al. Texture, microstructure and mechanical properties of AA7075-graphite composites produced through mechanical alloying and hot-extrusion. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;296:127323. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127323>.
27. Bazhin V.Yu., Beloglazov I.I., Il'in E.S., Kuskov V.B., Krylov K.A. *Installation for needle coke production*. Patent RF. no. 2784238; 2022. (In Russ.).
28. Yumeng Yang, Jiangzhong Liu, Mingyi Chen. Superfine comminution characteristics of low-rank coal pyrolysis semi-cokes and evolution of fragmentation fractal dimension. *Fuel*. 2022;325:124991. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124991>.
29. Bangaru S.S., Wang Chao, Zhou Xu, Hassan Marwa. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network. *Automation in Construction*. 2022;144:104602. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104602>.
30. Nohl J.F., Farr N.T.H., Sun Yige, Hughes G.M., Cussen S.A., Rodenburg C. Low-voltage SEM of air-sensitive powders: from sample preparation to micro/nano analysis with secondary electron hyperspectral imaging. *Micron*. 2022;156:103234. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103234>.
31. Asadi P., Beckingham L.E. Intelligent framework for mineral segmentation and fluid-accessible surface area analysis in scanning electron microscopy. *Applied Geochemistry*. 2022;143:105387.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105387>.

32. Sharikov Yu.V., Sharikov, F.Yu., Krylov, K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021;55:711-719.

<https://doi.org/10.1134/S0040579521030192>.

33. Sharikov F.Yu., Sharikov Yu.V., Krylov K.A. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary

kiln to produce anode petcoke. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;15(23):2904-2912.

34. Xu Xian, Cui Louwei, Shi Junhe, Liu Jiaojiao, Zhu Yonghong, Tian Yafei, et al. Effects of co-carbonization of medium and low temperature refined pitch and high temperature refined pitch on the structure and properties of needle coke. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;169:105783. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
✉ bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Крылов Кирилл Андреевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
krylov-j@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0587-8192>

Шариков Феликс Юрьевич,

д.т.н.,
главный научный сотрудник,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
felix101t@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

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 12.12.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принята к публикации 16.03.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Metallurgy Department,
Saint Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg,
199106, Russia
✉ bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Kirill A. Krylov,

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg
199106, Russia
krylov-j@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0587-8192>

Felix Yu. Sharikov,

Dr. Sci. (Eng.),
Leading Chief Researcher,
Saint Petersburg Mining University,
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg
199106, Russia
felix101t@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 12.12.2022; approved after reviewing 17.01.2023; accepted for publication 16.03.2023.