



DOI: 10.18721/JEST.26307
УДК 621.762.04

*Т.Х. Нгуен¹, В.М. Нгуен², Ю.В. Конюхов¹,
И.А. Введенская¹, А.А. Васильев¹*

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия;

² Институт исследований и разработок, Университет Дюя Тана, Дананг, Вьетнам

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ ГРАФИТОВОЙ СМЕСИ

В данной работе представлены данные по изучению процессов измельчения графитовой смеси с применением разных технологий обработки в аппаратах вихревого слоя и планетарной мельнице. Исследования проводились с использованием методов лазерного анализа распределения частиц по размерам, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Установлено, что обработка в планетарной мельнице *Pulverisette 7* в течение 60 мин приводит к получению полидисперсных частиц графитовой смеси, характеризующихся широким бимодальным распределением по размерам с ярко выраженными пиками максимумов в 12 и 24 мкм соответственно. Показано, что обработка графитовой смеси в аппаратах вихревого слоя АВС-80 и УАП-3 за 10 мин позволяет получить узкодисперсные частицы графита с максимумами распределения 13 и 11 мкм соответственно, что говорит о преимуществе и эффективности данной технологии по сравнению со случаем измельчения графитовой смеси в планетарной мельнице.

Ключевые слова: графит, размол, измельчение, обработка, распределение по размерам.

Ссылка при цитировании:

Нгуен Т.Х. и др. Влияние условий механической обработки на дисперсность частиц графитовой смеси // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 3. С. 90–100. DOI: 10.18721/JEST.26307

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*Т.Н. Nguyen¹, V.M. Nguyen², Yu.V. Konyukhov¹,
I.A. Vvedenskaya¹, A.A. Vasilev¹*

¹ National University of Science and Technology “MISiS”, Moscow, Russia;

² Institute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, Vietnam

INFLUENCE OF MECHANICAL PROCESSING ON THE DISPERSION OF GRAPHITE PARTICLES

This paper presents data on the study of grinding processes of a graphite mixture using various processing technologies in vortex layer devices and planetary mills. The studies were carried out using methods of laser analysis of particle size distribution, scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. Processing the graphite mixture in a *Pulverisette 7* planetary mill for 60 min was found to lead to the formation of polydisperse graphite particles characterized by a wide bimodal size distribution with pronounced maxima at 12 and 24 μm, respectively. We showed that processing the graphite mixture in the devices of vortex layer AVS-80 and UAP-3 in 10 min makes it possible to obtain finely dispersed graphite particles with maxima of the size

distribution at 13 and 11 μm respectively, which indicates the advantage and efficiency of this technology as compared to the case of grinding the graphite mixture in the planetary mill.

Keywords: graphite, grinding, milling, processing, size distribution.

Citation:

T.H. Nguyen et al., Influence of mechanical processing on the dispersion of graphite particles, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (03) (2020) 90–100, DOI: 10.18721/JEST.26307

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Процессы измельчения хорошо известны и широко используются в различных областях: металлургии, строительстве, горно-обогатительной и химической промышленности. Исходные материалы подвергаются измельчению за счет сдавливающих, разламывающих, разрывных, режущих, скручивающих, истирающих, а также других воздействий. Выбор подходящего метода измельчения зависит от следующих факторов: дисперсности материала, которую необходимо достичь, исходных размеров материала, его механических (твердость, прочность, пластичность) и температурных характеристик, химической активности и ее изменении в процессе измельчения, а также степени загрязнения материала мелющих шаров и продуктами износа мельницы, взрывоопасности и ряда других параметров. Наряду с этим, аппаратное оформление устройств измельчения должно быть достаточно простым, экономичным и надежным. В различных областях техники широко используются четыре типа мельницы: вибрационные, вращающиеся шаровые, струйные и ударные. Наибольшую популярность получили барабанные (шаровые) и планетарные мельницы [1], которые наряду с остальными обладают рядом недостатков, такими как высокая стоимость, большой расход электричества и длительное время обработки.

В середине 70-х годов прошлого века изобретены первые аппараты вихревого слоя (АВС), в которых в качестве размольных тел использовались иглы,двигающиеся под действием вращающегося магнитного поля [2, 3, 4, 5]. Данные аппараты позволяют осуществлять такие операции, как измельчение, механическую активацию исходных материалов, а, в частности, увеличивать реакционную способность обрабатываемого материала в последующих процессах и реакциях. Помимо этого, аппараты АВС позволяют перемешивать твердые сыпучие материалы, жидкости и газы, а также проводить сухое измельчение твердых веществ, осуществление химических реакций, изменение химических и физических свойств материалов [6]. Промышленные АВС выпускались в г. Полтава (Украина). Однако, производство полностью остановилось после распада СССР и до двухтысячных годов выпуск данных аппаратов не производился. Несмотря на это, интерес к данным аппаратам в последние года снова начал возрастать [7–9] и несколько отечественных производителей запустили выпуск АВС по заказу ряда промышленных предприятий. К преимуществам АВС относят низкую стоимость оборудования, достаточно короткое время обработки, порядка нескольких минут, а также относительно небольшое электропотребление.

Таким образом, сравнение степени измельчения материалов в традиционных мельницах и аппаратах вихревого слоя различной мощности обладает важным аспектом, как в научной, так и практической деятельности. Для достижения данной цели необходимо подобрать эталонный образец для измельчения, выбрать для сравнения наиболее подходящую мельницу, подобрать метод проведения эксперимента и изучить влияние времени измельчения на дисперсность и распределение частиц по размерам.

Тонкодисперсный порошок из графита с особыми физико-химическими свойствами находят применение в многих областях: в приборостроении и электротехнике порошок графита применяется при производстве электроприборов и батарей [10], в строительстве добавляют в цемент для достижения нужного оттенка [11], также используется в лакокрасочной промышленности и при изготовлении пластмасс [12, 13]. Графит представляет собой важный компонент в про-

изводстве густых и жидких универсальных и специальных смазочных материалов. Порошковый графит сохраняет хорошую адгезию к металлической поверхности при высокой температуре и считается незаменимым в технологических процессах в черной, цветной металлургии, в процессах металлообработки, производстве чугуна и стали. Сырье позволяет снизить количество бракованного материала и положительно повлиять на физико-химические свойства готовых изделий и т.д. [14–16].

Таким образом, целью данной работы являлось изучение влияния условий механической обработки на дисперсность частиц графита.

Материалы и методики исследований

В качестве материала для исследований использовалась графитовая смесь, состоящая из трех марок графита АРВ-1, ГМЗ и МПГ-6, соотношение которых одинаково. В течение трех часов в аппарате «пьяная бочка» проводилось предварительное смешение графитовой смеси. Основные физические характеристики компонентов смеси представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики графитовой смеси

Table 1

Main characteristics of the graphite mixture

Материал	АРВ-1	ГМЗ	МПГ-6
Плотность, г/см ³	1,76	1,60	1,65
Предел прочности на изгиб, МПа	4,5	8,8	34,4
Предел прочности при сжатии, МПа	29,4	20,6	73,6
Удельное электросопротивление, мкОм·м	16	11	15

Для механической обработки образцов графитовой смеси были выбраны 3 часто используемых дробильно-размольных оборудования: Планетарная мельница Pulverisette 7 (1); Аппарат вихревого слоя АВС-80 (2) и Аппарат вихревого слоя (установка активации процессов) УАП-3 (3). Разница между аппаратами АВС-80 и УАП-3 состоит в том, что в АВС-80 применена двухконтурная обмотка, что позволило уменьшить мощность с 25 до 2 кВт.

Процесс измельчения исходного материала в аппаратах вихревого слоя АВС-80 мощностью 2 кВт и УАП-3 мощностью 25 кВт происходил с использованием ферромагнитных рабочих тел (износостойких стальных игл) цилиндрической формы размером $\Phi 1,2 \times 20$ мм. Масса графитовой смеси при одной загрузке составляла 15–20 г, соотношение массы ферромагнитных тел к массе обрабатываемой смеси при этом составляло 4:1. Вращение рабочих тел в вихревом слое наводится электромагнитным полем индукцией 0.16 Тл, которое вращается со скоростью 3200 об/мин.

Процесс измельчения исходного материала в планетарной шаровой мельнице Pulverisette 7 мощностью 1,1 кВт осуществлялся с применением 15 мелющих шаров, диаметр которых составлял 10 мм каждый. Эти шары изготовлены из высоко износостойкого карбида вольфрама WC. Масса навески исходной графитовой смеси составляла 30 г, распределенных по двум стаканам в равных количествах. Скорость вращения водила и сосудов составляла 500 об/мин. Выбор скорости водила и сосудов основан на анализе литературных источников и результатов некоторых экспериментальных испытаний по измельчению различных материалов, в том числе материалов на основе графита в планетарных мельницах модели Pulverisette [17–21].

После обработки образцов графитовой смеси в разных установках в течение определенного времени рабочие тела отделялись от материала с помощью сита.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов получали на дифрактометре «ДИФРЕЙ 401» (Россия), Cr-K_α излучение, фокусировка по Бреггу-Бретано.

Распределение частиц графита по размерам определяли с помощью лазерного анализатора «FRITSCH ANALYSETTE 22» (Германия).

Микрофотографии порошков получали с помощью сканирующей электронной микроскопии «TESCAN VEGA 3SB» (Чехия). Источником электронов служил вольфрамовый катод прямого нагрева.

Результаты и обсуждение

Результат РФА и микроскопического анализа исходной графитовой смеси представлен на рис. 1. Видно, что все дифракционные максимумы соответствуют фазе графита с гексагональной кристаллической решеткой, следов других фаз было не обнаружено (рис. 1а). На рис. 1б представлено СЭМ-изображение исходной графитовой смеси. Показано, что данный углеродный материал можно отнести к мелкозернистому типу с хлопьевидной структурой. В основной массе частицы графита имеют неправильную форму и полидисперсны, их размер варьируется от нескольких до десятков мкм. При большем увеличении было замечено, что в материале присутствуют открытые мезо- и микропоры, что характерно для углеродных материалов.

На рис. 2 представлены результаты анализа распределения частиц графита по размерам для образца исходной смеси и образцов, обработанных в 3 выбранных установках в течение заданного времени.

С целью получения полидисперсного распределения частиц в исходном образце была взята графитовая смесь. Однако, полученный результат анализа дисперсности частиц графита на рис. 2а показывает, что в исходной смеси распределение частиц по размерам близкое к нормальному с максимумом распределения – 78 мкм. В образце присутствует фракция частиц менее 10 мкм, но ее количество не превышает 5 %. Максимальный размер частиц в исходной смеси больше 200 мкм.

Результат обработки исходного образца в планетарной мельнице Pulverisette 7 в течение 60 мин (рис. 2б) показывает, что на графике распределения частиц по размерам имеются 2 пика, соответствующие значениям размера частиц 12 и 24 мкм. Это говорит о бимодальности распределения, при этом максимальное значение распределения составило 24 мкм.

При обработке графитовой смеси в аппарате АВС-80 в течение 10 мин (рис. 2в) на графике распределения частиц по размерам присутствует один достаточно узкий пик с максимумом, приходящимся на 13 мкм.

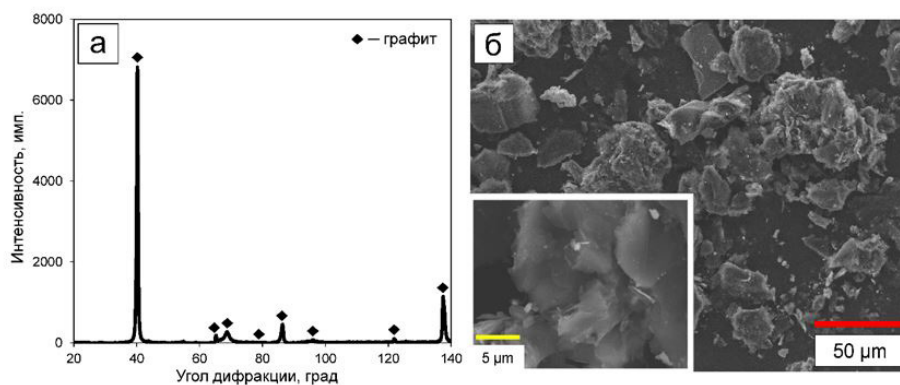


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и СЭМ-изображения (б) исходной графитовой смеси

Fig. 1. XRD pattern (a) and SEM photographs (b) of initial graphite mixture

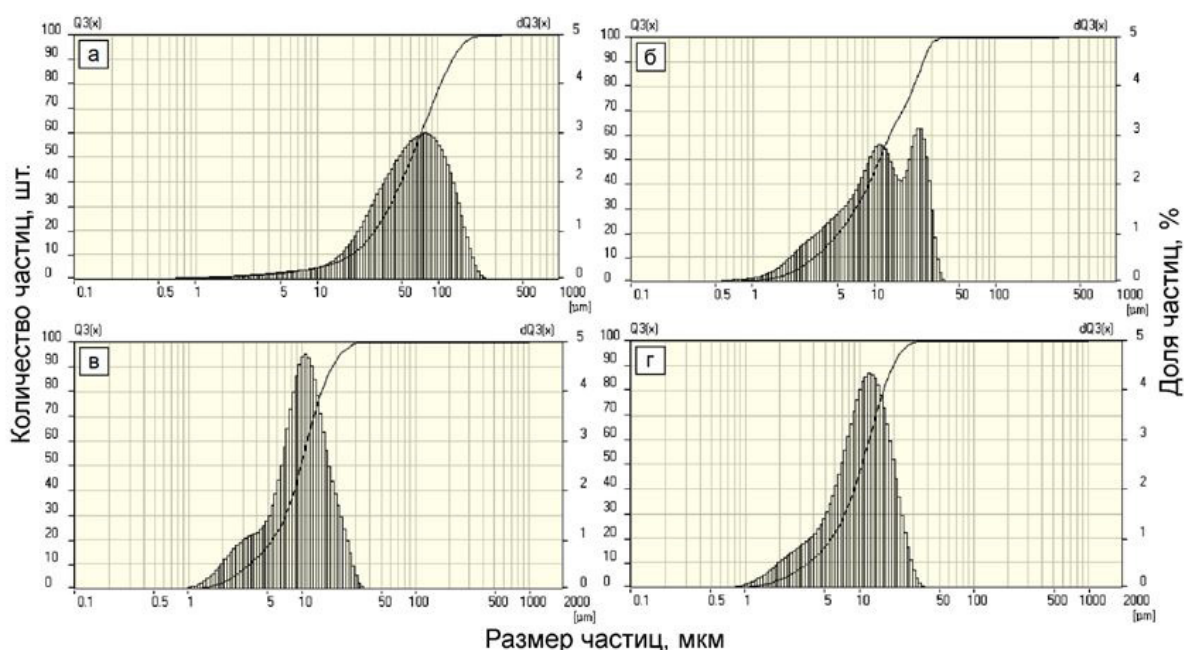


Рис. 2. Распределение частиц графита по размерам в исходном и обработанных в разных установках образцах графитовой смеси: а) исходный образец, б) Pulverisette 7 (60 мин), в) АВС-80 (10 мин), г) УАП-3 (10 мин)

Fig. 2. The size distribution of graphite particles of the initial sample and samples processed in different devices: а) initial sample, б) Pulverisette 7 (60 min), в) AVS-80 (10 min), г) UAP-3 (10 min)

Аналогично, при обработке графитовой смеси в аппарате УАП-3 лишь в течение 10 мин (рис. 2г) распределение частиц имеет такой же вид, как и в случае обработки в АВС-80, однако пик максимума чуть сместился налево, его величина приходится на 11 мкм.

Следует отметить, что по сравнению с случаем измельчения графитовой смеси в аппарате УАП-3, обработка материала в аппарате АВС-80 за 10 мин позволяет получить мелкие частицы графита с более узким распределением по размерам.

Обработка смеси в обоих случаях с применением технологии вихревого слоя ферромагнитных тел дает результат гораздо лучше, чем при использовании метода измельчения в планетарной мельнице, а именно, за более короткое время можно получить более мелкие частицы графита с узким распределением по размерам. Видно, что измельчение в планетарной мельнице главным образом происходит за счет простого механического удара и истирающего воздействия мелющих шаров на частицы графитовой смеси. В то время как при измельчении материала в установках вихревого слоя, в рабочей зоне, в единице ее объема сконцентрирована огромная энергия вихревого электромагнитного поля, которая вызывает вращение ферромагнитных тел с чрезвычайно большой скоростью (3200 об/мин). Интенсивное механическое воздействие ферромагнитных частиц на обрабатываемый материал в совокупности с рядом различных физико-химических эффектов (кавитация, ультразвук и др.) [2–5] позволяет достичь высокого уровня его измельчения и активации.

На рис. 3 представлены результаты электронно-микроскопического анализа частиц графитовой смеси в ходе обработки в разных установках.

По результатам измельчения графитовой смеси в планетарной мельнице Pulverisette 7 (рис. 3а) показано, что обработка в течение часа привела к уменьшению размеров частиц, но в образце остаются частицы, существенно отличающиеся по размерам (1–50 мкм). Полидисперс-

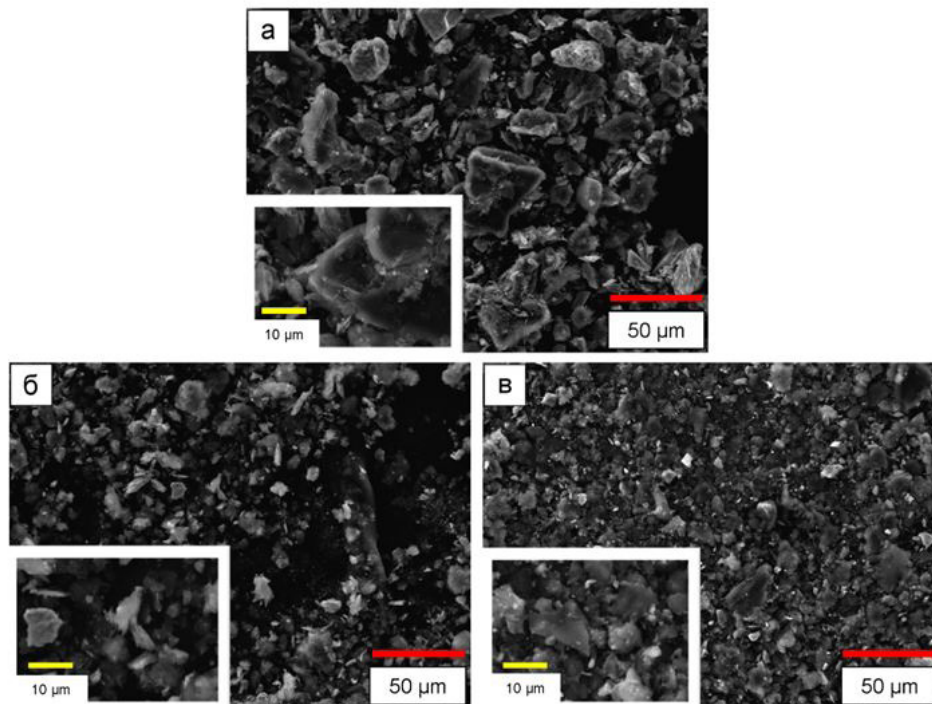


Рис. 3. СЭМ-изображения частиц графитовой смеси после обработки в:
 а) Pulverisette 7 (60 мин), б) ABC-80 (10 мин), в) УАП-3 (10 мин)
 Fig. 3. SEM photographs of graphite particles after processing in:
 а) Pulverisette 7 (60 min), б) AVS-80 (10 min), в) UAP-3 (10 min)

ность полученного образца и наличие в нем достаточно крупных частиц говорит о необходимости дальнейшего измельчения.

Анализ СЭМ-изображения, представленного на рис. 3б, выявляет, что при измельчении графитовой смеси в аппарате ABC-80 после 10 минут обработки средний размер выравнивается и стремится к размеру от 5 до 15 мкм. Форма частиц хлопьевидная.

Процесс измельчения в УАП-3 (рис. 3в) аналогичный, имеющий место при обработке в ABC-80. После 10 минут обработки в образце графитовой смеси главным образом имеются частицы размером от несколько до 15 мкм. При большем увеличении можно увидеть некоторое количество частиц размером меньше 1 мкм, но их доля невысока. Данные электронной микроскопии полностью согласуются с данными лазерного анализатора.

Обобщенные результаты проведенных экспериментов по измельчению графитовой смеси при механической обработке используя разные технологии приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Кинетика роста фракции частиц графита размером в интервале 10-20 мкм (рис. 4) определялась следующим образом: при измельчении графитовой смеси в данной установке через разные промежутки времени получали образцы, для которых дальше проводили исследование распределения частиц по размерам с помощью лазерного анализатора. Полученные гистораммы распределения частиц по размерам позволяют определить долю фракции частиц размером 10-20 мкм для каждого образца. Затем по этим данным построили кривые зависимости величины доли фракции частиц размером 10-20 мкм от времени измельчения.

Пробы, измельчаемые в аппаратах вихревого слоя брались через промежутки времени: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20 мин, а в случае измельчения в планетарной мельнице: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 40, 60 мин.

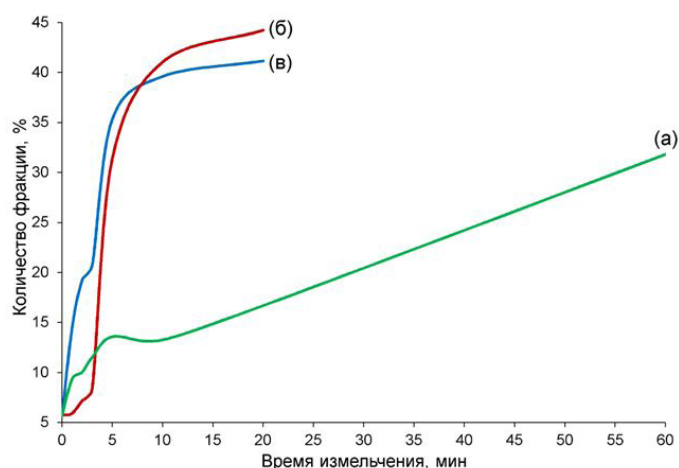


Рис. 4. Кинетика роста фракции частиц графита в интервале размеров от 10 до 20 мкм, измельченных в разных установках: а) Pulverisette 7, б) АВС-80, в) УАП-3

Fig. 4. The growth kinetic of graphite particles fraction in the size range from 10 to 20 μm, milled using different devices: a) Pulverisette 7, б) AVS-80, в) UAP-3

Таблица 2

Обобщенные результаты механической обработки графитовой смеси

Table 2

Generalized results of the mechanical processing of the graphite mixture

Установка	Мощность, кВт	Время обработки, мин	Максимум распределения, мкм	Количество пиков
Pulverisette 7	1,1	20	52	7
		60	24	2
АВС-80	2	5	16	1
		10	13	1
		20	13	1
УАП-3	25	5	12	1
		10	11	1
		20	11	1

Из табл. 2 следует, что эффективное измельчение графитовой смеси фактически достигнуто за 5-10 мин обработки в аппаратах вихревого слоя УАП-3 и АВС-80. Дальнейшая обработка материала использованием данной технологии практически не приводит к смещению максимумов распределения частиц графита по размерам в область меньших значений.

Несмотря на то, что планетарная мельница обладает способностью к измельчению материала до уровней размеров частиц, близких к достигаемым значениям при обработке в аппаратах вихревого слоя, ей требуется гораздо больше времени. Это свидетельствует о ее меньшей эффективности.

На рис. 4 видно, что в течение первых 5-ти минут обработка в аппарате УАП-3 (рис. 4в) показывает лучшие результаты, однако при дальнейшем помоле в аппарате АВС-80 (рис. 4б) удается получить большую долю частиц в размере 10-20 мкм (т.е. в общем сузить распределение частиц

графита по размерам). В обоих случаях применения механической обработки в аппаратах вихревого слоя, увеличение времени обработки от 10 до 20 мин и дальше не принесло заметных изменений в результате измельчения графитовой смеси.

В случае измельчения материала в установке Pulverisette 7 (рис. 4а) видна заметная тенденция роста количества фракции частиц таких размеров, но в течение большего времени, чем при использовании технологии размола в аппаратах вихревого слоя. Можно сделать вывод, что в планетарной мельнице измельчение графита происходило с более низкой скоростью и эффективностью по сравнению со случаем в аппаратах вихревого слоя.

Выводы

Установлено, что обработка в планетарной мельнице Pulverisette 7 в течение 60 мин приводит к получению полидисперсных частиц графитовой смеси, характеризующихся широким бимодальным распределением с ярко выраженными пиками максимумов в 12, 24 мкм соответственно.

Показано, что измельчение графитовой смеси в аппаратах вихревого слоя УАП-3 и АВС-80 позволяет достигать узкого распределения частиц по размерам с максимумами распределения 13 и 11 мкм соответственно, что говорит о преимуществе и эффективности данной технологии по сравнению с случаем измельчения графитовой смеси в планетарной мельнице.

Эффективное измельчение графитовой смеси фактически достиглось за 5-10 мин обработки в аппаратах вихревого слоя. Дальнейшая обработка материала использованием данной технологии не принесло заметных изменений в результате измельчения графитовой смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Ходаков Г.С.** Физика измельчения. М.: Наука. 1972. 307 с.
- [2] **Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П.** Интенсификация технологических процессов в аппаратах вихревого слоя. Киев: Техника. 1976. 113 с.
- [3] **Вершинин И.Н., Вершинин Н.П.** Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Сальск.: Передовые технологии XXI века. 2007. 368 с.
- [4] **Nguyen V.M., Karunakaran G., Konyukhov Y.** Effect of Mixing Modes and Nano Additives on the Densification and Sintering Behavior of Tungsten Material Under Spark Plasma Sintering // Journal of Cluster Science. 2017. Vol. 28(5). P. 2905–2917.
- [5] **Nguyen V.M., Khanna R., Konyukhov Y., Nguyen T.H., Burmistrov I., Levina V. Golov I., Karunakaran G.** Spark Plasma Sintering of Cobalt Powders in Conjunction with High Energy Mechanical Treatment and Nanomodification // Processes. 2020. Vol. 8(5). 627 p.
- [6] **Аввакумов Е.Г.** Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука. 1987. 205 с.
- [7] **Мищенко М.В., Боков М.М., Гришаев М.Е.** Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем // Фундаментальные исследования. 2015. No. 2. С. 3508–3512.
- [8] **Кузнецов Д.В., Костицын М.А., Колюхов Ю.В.** Разработка методики модифицирования наноматериалами муллитокорундовых смесей в аппаратах с высокоинтенсивным вращающимся электромагнитным // Новые огнеупоры. 2012. No. 2. С. 35–40.
- [9] **Рыжонков Д.И., Нгуен В.М., Колюхов Ю.В.** Кинетические закономерности процессов водородного восстановления нанопорошка α -Fe₂O₃ при энергомеханической обработке в электромагнитном поле // Физика и химия обработки материалов. 2018. No. 1. С. 66–74.
- [10] **Yin L., Deng C., Deng F., Ge X.** Analysis of the interaction energies between and within graphite particles during mechanical exfoliation // New Carbon Materials. 2018. Vol. 33. No. 5. P. 449–459.

- [11] Han Y., Lai K.C., Lii-Rosales A., Tringidesa M.C., Evansa J.W., Thiela P.A. Surface energies, adhesion energies, and exfoliation energies relevant to copper-graphene and copper-graphite systems. *Surface Science*. 2019. Vol. 685. P. 48–58.
- [12] Shaji S., Radhakrishnan V. An investigation on surface grinding using graphite as lubricant // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42. P. 733–740.
- [13] Martinez D.S.T., Damasceno J.P.V., Franqui L.S., Bettini J., Mazali I.O., Strauss M. Structural aspects of graphitic carbon modified SBA-15 mesoporous silica and biological interactions with red blood cells and plasma proteins // *Materials Science and Engineering: C*. 2017. T. 78. C. 141–150.
- [14] Kjeang E., McKechnie J., Sinton D., Djilali N. Planar and three-dimensional microfluidic fuel cell architectures based on graphite rod electrodes. *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 168. No. 2. P. 379–390.
- [15] Heckmann A., Meister P., Gao P., Winter M., Placke T. Synthesis of Spherical Graphite Particles Possessing a Definable Size and Their Application in Dual-Graphite Cells // *The Electrochemical Society*. 2015. No. 4. P. 720–720.
- [16] Peng T., Chang I. Uniformly dispersion of carbon nanotube in aluminum powders by wet shake-mixing approach // *Powder Technology*. 2015. Vol. 284. P. 32–39.
- [17] Pragatheeswaran A., Ravi R., Bakshi S.R. Microstructural and morphological changes during ball milling of Copper-Silver-Graphite flake mixtures // *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30. P. 2759–2767.
- [18] Yoon J., Kim I.T., Bae J., Hur J. High-performance ZnS@graphite composites prepared through scalable high-energy ball milling as novel anodes in lithium-ion batteries // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. Vol. 76. P. 258–267.
- [19] Jalili F., Zhiani M., Kamali S. Preparation and evaluation of a new hybrid support based on exfoliation of graphite by ball milling for Ni nanoparticles in hydrogen evolution reaction // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 30. P. 1–9.
- [20] Sivakkumar S.R., Milev A.S., Pandolfo A.G. Effect of ball-milling on the rate and cycle-life performance of graphite as negative electrodes in lithium-ion capacitors // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56(27). P. 9700–9706.
- [21] Yue X., Yu K., Ji L., Wang Z., Zhang F., Qian L., Zhang R. Effect of heating temperature of expandable graphite on amorphization behavior of powder expanded graphite-Fe mixtures by ball-milling // *Powder Technology*. 2011. Vol. 211(1). P. 95–99.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН Тиен Хиеп – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, без степени.

E-mail: htnru7@yandex.ru

НГУЕН Ван Минь – Институт исследований и разработок, Университет Дуя Тана, Вьетнам, канд. техн. наук.

E-mail: chinhnhan88@gmail.com

КОНЮХОВ Юрий Владимирович – доцент, доктор технических наук, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», д-р техн. наук.

E-mail: martensit@mail.ru

ВВЕДЕНСКАЯ Ирина Андреевна – студент-магистр, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», без степени.

E-mail: vkrak@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВ Андрей Александрович – аспирант, *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», без степени.*

E-mail: raver.vasiljev@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 12.06.2020

REFERENCES

- [1] **G.S. Khodakov**, *Fizika izmelcheniya*. M.: Nauka. 1972. 307 s.
- [2] **D.D. Logvinenko, O.P. Shelyakov**, *Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh vikhrevogo sloya*. Kiyev: Tekhnika. 1976. 113 s.
- [3] **I.N. Vershinin, N.P. Vershinin**, *Apparaty s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem*. Salsk.: *Peredovyye tekhnologii XXI veka*. 2007. 368 s.
- [4] **V.M. Nguyen, G. Karunakaran, Y. Konyukhov**, Effect of Mixing Modes and Nano Additives on the Densification and Sintering Behavior of Tungsten Material Under Spark Plasma Sintering // *Journal of Cluster Science*. 2017. Vol. 28(5). P. 2905–2917.
- [5] **V.M. Nguyen, R. Khanna, Y. Konyukhov, T.H. Nguyen, I. Burmistrov, V. Levina, I. Golov, Karunakaran G.** Spark Plasma Sintering of Cobalt Powders in Conjunction with High Energy Mechanical Treatment and Nanomodification // *Processes*. 2020. Vol. 8(5). 627 p.
- [6] **Ye.G. Avvakumov**, *Mekhanicheskiye metody aktivatsii khimicheskikh protsessov*. Novosibirsk: Nauka. 1987. 205 s.
- [7] **M.V. Mishchenko, M.M. Bokov, M.Ye. Grishayev**, Aktivatsiya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki materialov v apparatakh s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem // *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2015. No. 2. S. 3508–3512.
- [8] **D.V. Kuznetsov, M.A. Kostitsyn, Yu.V. Konyukhov**, Razrabotka metodiki modifitsirovaniya nanomaterialami mullitokorundovykh smesey v apparatakh s vysokointensivnym vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem // *Novyye ognepory*. 2012. No. 2. S. 35–40.
- [9] **D.I. Ryzhonkov, V.M. Nguyen, Yu.V. Konyukhov**, Kineticheskiye zakonomernosti protsessov vodorodnogo vosstanovleniya nanoporoshka α -Fe₂O₃ pri energomekhanicheskoy obrabotke v elektromagnitnom pole // *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2018. No. 1. S. 66–74.
- [10] **L. Yin, C. Deng, F. Deng, X. Ge**, Analysis of the interaction energies between and within graphite particles during mechanical exfoliation // *New Carbon Materials*. 2018. Vol. 33. No. 5. P. 449–459.
- [11] **Y. Han, K.C. Lai, A. Lii-Rosales, M.C. Tringidesa, J.W. Evans, P.A. Thiel**, Surface energies, adhesion energies, and exfoliation energies relevant to copper-graphene and copper-graphite systems. *Surface Science*. 2019. Vol. 685. P. 48–58.
- [12] **S. Shaji, V. Radhakrishnan**, An investigation on surface grinding using graphite as lubricant // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42. P. 733–740.
- [13] **D.S.T. Martinez, J.P.V. Damasceno, L.S. Franqui, J. Bettini, I.O. Mazali, M. Strauss**, Structural aspects of graphitic carbon modified SBA-15 mesoporous silica and biological interactions with red blood cells and plasma proteins // *Materials Science and Engineering: C*. 2017. T. 78. S. 141–150.
- [14] **E. Kjeang, J. McKechnie, D. Sinton, N. Djilali**, Planar and three-dimensional microfluidic fuel cell architectures based on graphite rod electrodes. *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 168. No. 2. P. 379–390.
- [15] **A. Heckmann, P. Meister, P. Gao, M. Winter, T. Placke**, Synthesis of Spherical Graphite Particles Possessing a Definable Size and Their Application in Dual-Graphite Cells // *The Electrochemical Society*. 2015. No. 4. P. 720–720.
- [16] **T. Peng, I. Chang**, Uniformly dispersion of carbon nanotube in aluminum powders by wet shake-mixing approach // *Powder Technology*. 2015. Vol. 284. P. 32–39.

[17] **A. Pragatheeswaran, R. Ravi, S.R. Bakshi**, Microstructural and morphological changes during ball milling of Copper-Silver-Graphite flake mixtures // *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30. P. 2759–2767.

[18] **J. Yoon, I.T. Kim, J. Bae, J. Hur**, High-performance ZnS@graphite composites prepared through scalable high-energy ball milling as novel anodes in lithium-ion batteries // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. Vol. 76. P. 258–267.

[19] **F. Jalili, M. Zhiani, S. Kamali**, Preparation and evaluation of a new hybrid support based on exfoliation of graphite by ball milling for Ni nanoparticles in hydrogen evolution reaction // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 30. P. 1–9.

[20] **S.R. Sivakkumar, A.S. Milev, A.G. Pandolfo**, Effect of ball-milling on the rate and cycle-life performance of graphite as negative electrodes in lithium-ion capacitors // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56(27). P. 9700–9706.

[21] **X. Yue, K. Yu, L. Ji, Z. Wang, F. Zhang, L. Qian, R. Zhang**, Effect of heating temperature of expandable graphite on amorphization behavior of powder expanded graphite-Fe mixtures by ball-milling // *Powder Technology*. 2011. Vol. 211(1). P. 95–99.

THE AUTHORS

NGUYEN Tien Hiep – *National University of Science and Technology MISiS*.

E-mail: htnru7@yandex.ru

NGUYEN Van Minh – *Institute of Research and Development, Duy Tan University*.

E-mail: chihnhan88@gmail.com

KONYUKHOV Yuri V. – *National University of Science and Technology MISiS*.

E-mail: martensit@mail.ru

VVEDENSKAYA Irina A. – *National University of Science and Technology MISiS*.

E-mail: vvkarak@yandex.ru

VASILEV Andrei A. – *National University of Science and Technology MISiS*.

E-mail: raver.vasiljev@mail.ru

Received: 12.06.2020