

DOI: 10.18721/JEST.230413

УДК 621.762

С.А. Котов, С.-В.Р. Музафарова, Д.А. Сафронов, Л.П. Батунова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ ПОРОШКОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Импульсные емкостные накопители энергии (ИЕНЭ), где в качестве накопительного элемента выступает жидкостный конденсатор, должны обеспечивать большие разрядные токи и номинальную емкость, длительную сохраняемость заряда и высокую постоянную времени разряда. В данной работе в качестве материала обкладок конденсатора был выбран терморасширенный графит, для которого характерна высокоразвитая внутренняя поверхность, причем с целью наиболее эффективного ее использования электрод предварительно пропитывали электролитом. Исследования, проведенные на кафедре «Технология и исследование материалов» и в лаборатории «Физическая химия», показали, что на электродах из терморасширенного графита формируется адсорбционный слой с высокой емкостью. Кроме того, в работе представлены результаты исследований уплотнения порошков терморасширенного графита, рассмотрены способы формования на их основе электродов для источников энергии. Проведены исследования электрохимических свойств полученных электродов. Они позволяют рекомендовать терморасширенный графит к использованию в качестве электродного материала для обкладок жидкостных конденсаторов.

ТЕРМОРАСШИРЕННЫЙ ГРАФИТ; ПОРОШОК; УПЛОТНЯЕМОСТЬ; ЭЛЕКТРОД; ПРЕССОВАНИЕ; ЭЛЕКТРОХИМИЯ; ПОРИСТОСТЬ.

Ссылки при цитировании:

С.А. Котов, С.-В.Р. Музафарова, Д.А. Сафронов, Л.П. Батунова. Исследование процессов получения высокопористых электродов из порошков терморасширенного графита // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 132–140. DOI: 10.18721/JEST.230413.

S.A. Kotov, S.-V.R. Muzafarova, D.A. Safronov, L.P. Baturova

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. St. Petersburg, Russia

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF OBTAINING HIGH-POROUS ELECTRODES FROM POWDERS OF THERMALLY EXPANDED GRAPHITE

A pulsed capacitive energy storage must provide a high discharge current and a nominal capacity, a long persistence of the charge and a high discharge time constant. A liquid condenser can be used as the storage element in pulsed capacitive energy storage. In this paper, the thermally expanded graphite was chosen as a material of the capacitor plates. Thermally expanded graphite is characterized by a highly developed inner surface. Our studies have shown that the adsorption layer characterized by the high capacity is formed from expanded graphite electrodes. In addition, the paper presents the investigation results of compaction of expanded graphite powders. The methods of forming the electrodes on the basis of expanded graphite powders for energy sources have been considered. Investigations have been carried out on the electrochemical properties of the obtained electrodes. These investigations allow recommending the use of thermally expanded graphite as the electrode material for electrodes of liquid capacitors.

THERMALLY EXPANDED GRAPHITE; POWDER; COMPACTABILITY; ELECTRODE; PRESSING; ELECTROCHEMISTRY; POROSITY.

Citation:

S.A. Kotov, S.-V. R. Muzafarova, D.A. Safronov, L.P. Baturova, Investigation of the processes of obtaining high-porous electrodes from powders of thermally expanded graphite, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017) 132–140, DOI: 10.18721/JEST.230413.

Введение

Большинству современных отраслей промышленности необходимы изделия с высоким уровнем свойств, который нельзя получить традиционными металлургическими способами; для этого требуются современные материалы и технологии. Использование современных методов формования материалов, нанесения покрытий, модификации поверхности позволяет получать изделия с определенными заданными функциональными свойствами. Благодаря комплексному подходу к решению таких задач можно получать изделия для различных отраслей промышленности, таких, как авиостроение, космостроение, приборостроение и электроника [1–5].

Наблюдается интерес к субмикроструктурному и нанокристаллическому материалам с однородной микроструктурой и прогнозируемыми на этой основе физико-механическими и специальными свойствами.

Развитие многих отраслей невозможно без разработки источников тока и новых типов накопителей энергии.

Технический прогресс в области жидкостных конденсаторов различного типа связан в значительной степени с разработкой новых технологий и материалов, обеспечивающих высокие удельные характеристики, длительную сохраняемость заряда, значительную экономическую эффективность и экологическую чистоту. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является применение высокопористых проницаемых электродов, изготовленных методами порошковой металлургии, которые позволяют проводить процессы при больших токах в области малых поляризации, что обеспечивает высокую эффективность электрохимического процесса.

Цель работы. Цель данной работы — исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита (ТРГ) и определение возможности их применения в качестве

электродов для источников энергии, а также исследование электрохимической активности данных электродов.

Материал и методика. Для разработки технологий получения изделий различного (в том числе и электрохимического) назначения актуально изучение процессов формования ТРГ — прессования и прокатки как чистых порошков, так и содержащих добавки [6, 7].

Порошки ТРГ могут быть получены различными методами и в зависимости от этого иметь различные свойства. Одно из важнейших свойств — насыпная плотность, которая в зависимости от метода получения может изменяться в пределах 0,0016–0,0134 г/см³. Такой диапазон позволяет получать высокопористые и высокоплотные изделия [8].

Экспериментальная часть. В ходе исследований процесса уплотнения выявлено, что для порошков ТРГ характерна протяженная зона структурного уплотнения, т.е. он формируется в широком диапазоне плотностей при давлениях от 0,023 до 407,4 МПа (усилия от 0,5 до 8800 кг). Описать процесс уплотнения одним видом математической зависимости плотности от давления оказалось невозможным в силу физических свойств ТРГ [9]: дело в том, что уплотнение данного порошка в различных диапазонах давлений идет по разным законам. Решению этой задачи было уделено особое внимание. На первой стадии процесса формования при малых давлениях происходит структурная переупаковка частиц порошка, затем — их уплотнение за счет разветвленной формы частиц (типа «воздушной кукурузы») и, наконец, их деформация. Поэтому при анализе процесса уплотнения было предложено разделить всю зону формования на три участка — с диапазонами усилий соответственно от 0,5 до 10 кг, от 20 до 450 кг, от 450 до 8800 кг при использовании пресс-формы диаметром 16,6 мм.

Был выбран небольшой шаг изменения усилий при прессовании на первом участке, что позволило получить значения плотности при малых давлениях. Сначала прессование

производилось при малых усилиях — от 0,3 до 20 кг. Для увеличения высоты конечной прессовки производилась неоднократная досыпка порошка с последующей подпрессовкой.

Далее прессование производилось при бóльших давлениях.

Кривую уплотняемости при усилиях от 0,5 до 8800 кг можно описать логарифмической функцией: $y = 0,0855 \ln x + 0,2428$.

Однако экспериментальные данные при больших давлениях плохо описываются данной зависимостью. На рис. 1 видно, что экспери-

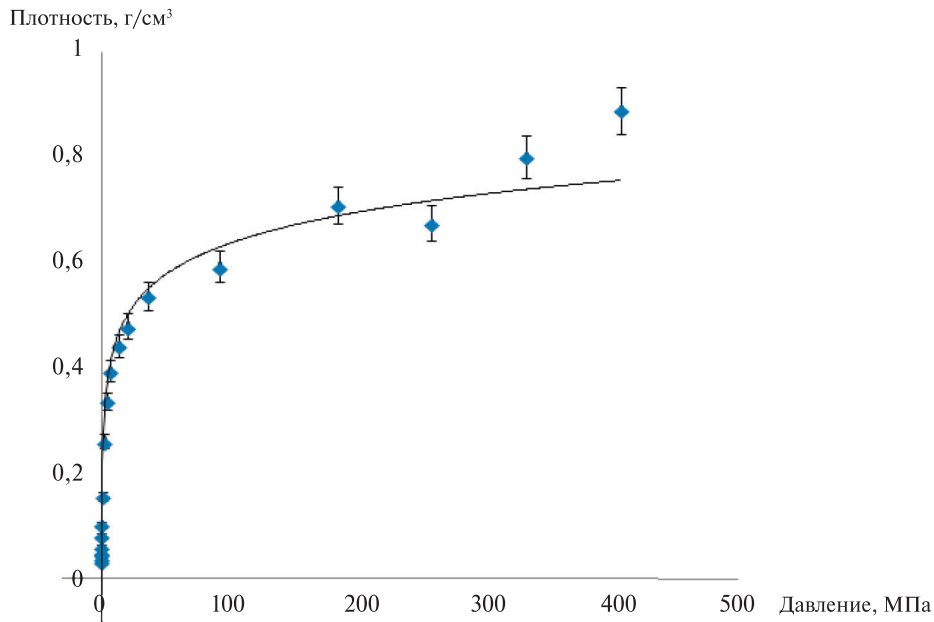


Рис. 1. Общая кривая уплотняемости порошка терморасширенного графита
Fig. 1. The general curve of the compactability of thermally expanded graphite powder

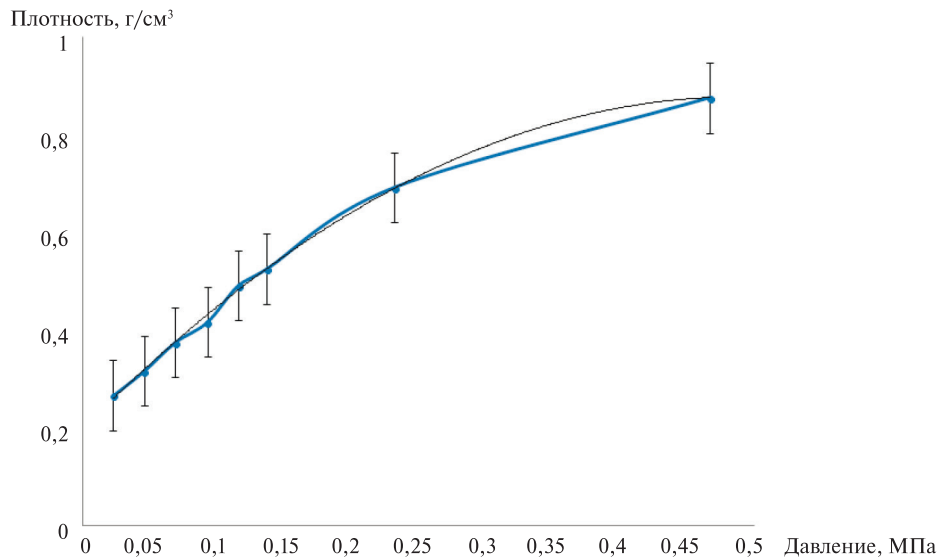


Рис. 2. Кривая уплотняемости порошка терморасширенного графита при давлениях от 0,023 до 0,46 МПа
Fig. 2. The curve of compactability of thermally expanded graphite powder at pressures from 0,023 to 0,46 МПа

ментальные данные не попадают в доверительные интервалы теоретически предложенной кривой.

На рис. 2 представлена кривая уплотняемости порошка ТРГ при усилиях от 0,5 до 10 кг. Уравнение, описывающее первый участок кривой, близко к уравнению полиномиальной функции второй степени:

$$y = -0,3416x^2 + 0,3338x + 0,0237.$$

Эти уравнения наиболее точно описывают экспериментальные данные.

В ходе работы также была исследована микроструктура прессовок. Структура частиц исходного порошка — слоисто-ячеистая с высокой внутренней пористостью и большим количеством спаек, что благоприятно для процесса формования порошка при низких давлениях. В прессовке, полученной при давлении 0,023 МПа (усилие 0,5 кг), частицы порошка не разрушены, хорошо видна их пластинчатая структура, между частицами видны крупные поры, соизмеримые с размерами частиц (рис. 3).

При ее сравнении с прессовкой, полученной при давлении 0,232 МПа (усилие 5 кг), видно, что произошла переупаковка частиц при неизменности структуры, уменьшился размер пор между частицами (рис. 4). При дальнейшем увеличении давления происходит уплотнение частиц порошка за счет их разветвленной формы. При больших давлениях прессования наблюдалось уже незначительное разрушение частиц, их деформация. Начиная с давления 2,31 МПа (усилие 50 кг) отдельные частицы уже не просматриваются, так как находятся в деформированном состоянии, растет поверхность контакта между ними.

Для получения длиномерных изделий целесообразно применять способ прокатки, описанный в [10]. Так, если при прессовании структура поверхностных и внутренних слоев одинакова, то при прокатке внешние и внутренние слои различаются пористостью (внешние слои из-за закрытия пор при прокатке практически беспористы). В соответствии с этим степень заполнения электролитом порового пространства электрода из ТРГ будет определяться, прежде всего, проницаемостью поверхностного слоя и структурой пор. Таким образом, порошки ТРГ можно использовать для получения высокопористых и высокоплотных изделий.



Рис. 3. Микроструктура образца, полученного при давлении 0,023 МПа ($\times 50$)

Fig. 3. The microstructure of the sample obtained at a pressure of 0,023 MPa ($\times 50$)

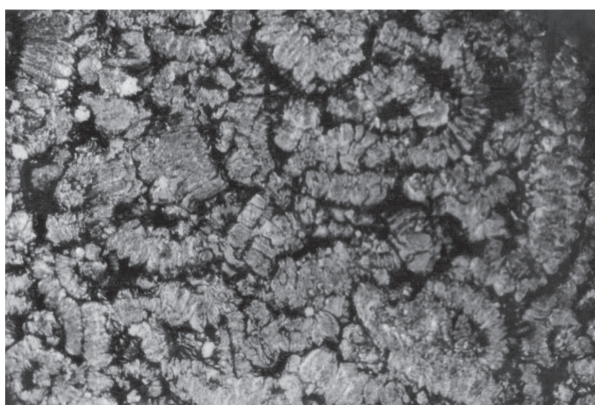


Рис. 4. Микроструктура образца, полученного при давлении 0,232 МПа ($\times 50$)

Fig. 4. The microstructure of the sample obtained at a pressure of 0,232 MPa ($\times 50$)

В зависимости от свойств электрода и электролита глубина проникновения последнего может изменяться в широких пределах. Чем больше глубина проникновения электролита, тем более эффективно будет использоваться объем электрода.

В различных областях электрохимии находят широкое применение пористые электроды [11]. Они имеют большую истинную поверхность по сравнению с внешней геометрической поверхностью и позволяют реализовывать большие токи при относительно небольшой поляризации. По мере увеличения толщины пористого электрода доступ электролита в глубину материала уменьшается. Поэтому важно создавать такие пористые электроды, в которых будет

участвовать весь объем, при этом электрод должен быть инертным по отношению к электролиту, а также обладать определенной механической прочностью [Патент РФ № 2121727, 18.04.97. Конденсатор высокой удельной энергоемкости / С.А. Котов, Л.П. Батунова, Н.Н. Павлов, М.В. Бобылева, П.Н. Бондаренко, С.А. Шевченко].

Эффективность работы пористых электродов зависит прежде всего от дисперсности частиц, составляющих активную массу. В настоящей работе использовали углеродные электроды, изготовленные из активированных плазмохимическим методом (ПХМ) порошков природного графита. Плазмохимическая обработка давала возможность получать низкоплотные углеродные порошки, отличающиеся от исходных высококоразвитой поверхностью, высокой пластичностью и формуемостью. Ранее был разработан способ изготовления высокоэффективных и достаточно механически прочных углеродных электродов без связующих добавок различного функционального назначения. Для них в качестве основы матрицы были использованы активированные ПХМ природные графитовые порошки, имеющее удельную поверхность $S > 1000 \text{ м}^2/\text{г}$. Такие электроды можно использовать в качестве обкладок жидкостных

конденсаторов высокой удельной емкости или в емкостных накопителях энергии, способных отдавать большие, порядка 10 кВт/кг мощности за короткий промежуток времени.

Материал электродов должен удовлетворять целому ряду требований: обладать высококоразвитой поверхностью, малыми значениями удельного сопротивления, стойкостью к химическим воздействиям при электрохимических процессах, технологичностью получения электродов из заданного материала. Всем этим требованиям отвечает терморасширенный графит, имеющий хорошую термическую стойкость во многих агрессивных средах, высокую теплопроводность, низкий коэффициент термического расширения, не подвергающийся коррозии, не стареющий и не растрескивающийся [12–14].

Активность электродов из терморасширенного графита определяется степенью проникновения электролита в поровое пространство электрода, распределением тока и потенциала по его глубине [15].

Актуальны исследования композиционных материалов, содержащих наночастицы. Характер и степень влияния наночастиц на свойства композитных материалов в значительной степени определяется типом матрицы, в которую

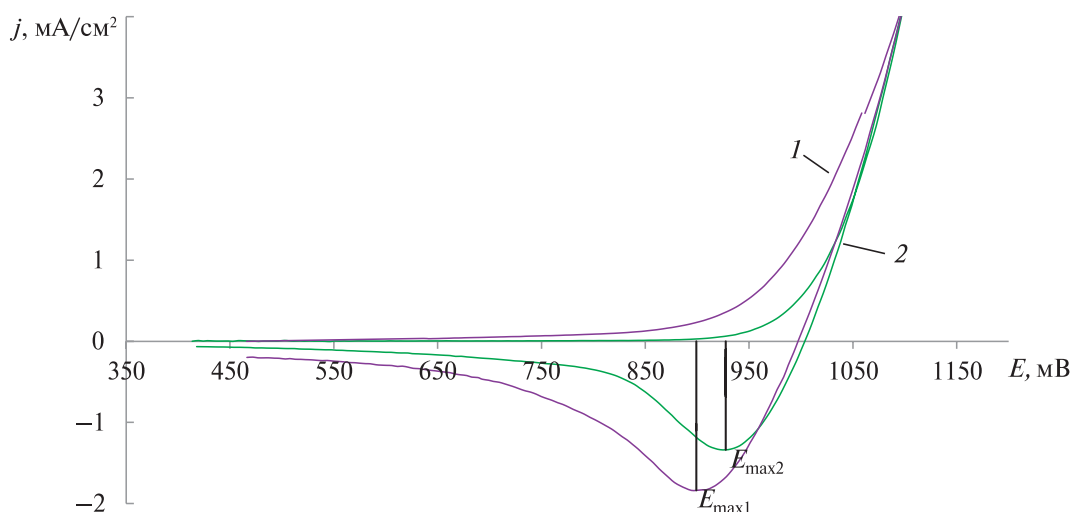


Рис. 5. Вольт-амперная кривая:

1 — электрод терморасширенного графита, пропитанный однонормальным раствором бромид калия KBr/KBr; 2 — пористый электрод терморасширенного графита/KBr

Fig. 5. Volt-ampere curve:

1 — the electrode of thermally expanded graphite, impregnated with a single-normal solution of potassium bromide KBr/KBr; 2 — porous thermally expanded graphite electrode/KBr electrode/KBr

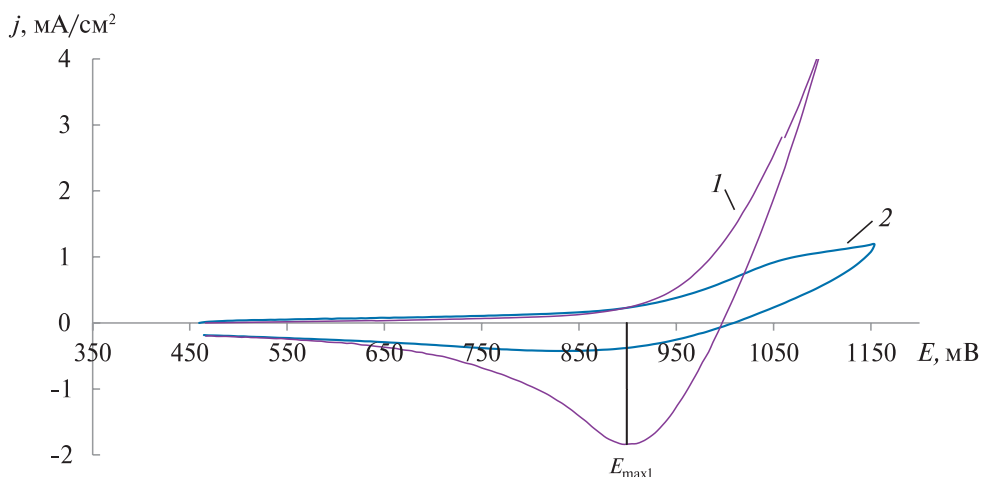


Рис. 6. Вольт-амперная кривая:

1 — электрод терморасширенного графита, пропитанный однонормальным раствором бромид калия KBr/KBr ; 2 — электрод терморасширенного графита, пропитанный однонормальным раствором бромид калия $\text{KBr}/\text{Na}_2\text{SO}_4$

Fig. 6. Volt-ampere curve:

1 — the electrode of thermoexpanded graphite, impregnated with a single-normal solution of potassium bromide KBr/KBr ; 2 — thermal expanded graphite electrode impregnated with a single-normal solution of potassium bromide $\text{KBr}/\text{Na}_2\text{SO}_4$

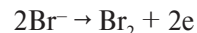
вводятся наночастицы. В работе проведено исследование влияния добавок фуллеренов и углеродных нанотрубок в активную массу пористых электродов на повышение электрохимических характеристик.

Исследования проводились на однонормальном растворе KBr в условиях потенциодинамической поляризации для интервалов потенциала, соответствующих работе электродов, с помощью потенциостата.

В качестве меры электрохимической активности пористого электрода была выбрана величина тока максимума, наблюдаемого на катодной ветви вольт-амперной кривой и связанного с процессом восстановления брома.

Снятие циклических вольт-амперных кривых при скорости развертки потенциала 5 мВ/с на пористом электроде из ТРГ и пористом электроде, пропитанном однонормальным раствором KBr , в интервале потенциалов 0,2–0,9 В показало, что на пористом электроде из ТРГ на анодной и катодной ветвях вольт-амперной кривой при потенциалах соответственно 1,1 В и 0,93 В наблюдаются максимумы анодного и катодного токов (рис. 5).

Пористый электрод имеет закрытую пористость, поэтому реакция окисления бромид



протекает только на внешней поверхности.

В случае электрода ТРГ, пропитанного KBr , процесс окисления начинается раньше, так как протекает не только на внешней поверхности, но и в поровом пространстве. Кроме того, кривая имеет более широкий максимум ($j_{\text{кmax(пр)}} > j_{\text{кmax}}$).

Для определения доли процесса, протекающего в поровом пространстве, пористый электрод из ТРГ, предварительно пропитанный раствором KBr , помещали в раствор Na_2SO_4 . Реакция окисления протекала только в поровом пространстве. Кривая получилась размытой, не наблюдается отчетливого максимума (рис. 6) вследствие того, что реакция окисления протекает только в поровом пространстве.

Фуллерены обладают низкой проводимостью. Вводя фуллерены в поровое пространство, можно исследовать их влияние на электрохимическую активность. На вольт-амперной кривой для электрода, пропитанного раствором фуллеренов, отсутствует максимум катодной кривой, что говорит о торможении катодного процесса. Анодный процесс немного замедляется, но полностью не прекращается (рис. 7). Введение фуллеренов смещает потенциал в отрицательную сторону на 0,017 В (17 мВ).

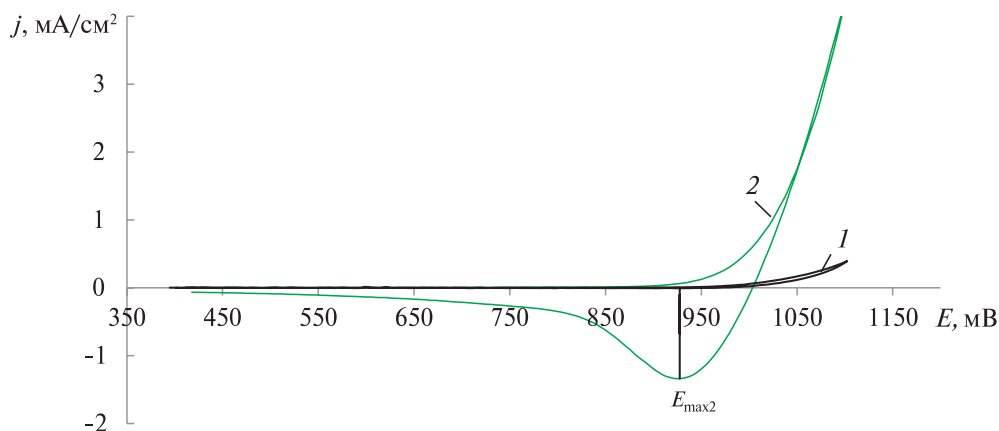


Рис. 7. Вольт-амперная кривая:
 1 — пористый электрод терморасширенного графита/C₆₀ (в поверхностном слое);
 2 — пористый электрод терморасширенного графита/KBr
 Fig. 7. Volt-Ampere Curve:
 1 — porous electrode of thermally expanded graphite/C60 (in the surface layer);
 2 — porous thermally expanded graphite electrode/KBr

Анодная кривая имеет тенденцию к росту, т.е. бром образуется, но не восстанавливается. Для наиболее полного описания процесса следует снять обратный ход при больших значениях потенциала.

Кинетические особенности электрохимического поведения высокопористых углеродных электродов в работе проводили потенциодинамическим методом в смешанном сульфатно-бромидном растворе, исследуя процессы выделения и восстановления брома. Для того чтобы выявить степень участия внутренней поверхности пористого углеродного электрода, исследование редокс-процессов необходимо проводить на гладком электроде — стеклогуглероде.

Для повышения электрохимической активности пористых углеродных электродов можно также вводить в активную массу электродов открытые углеродные нанотрубки, которые могут проявлять капиллярный эффект и способны втягивать в себя жидкие и газообразные вещества.

Как показали исследования, введение от 1 до 5% графитовых нанотрубок в активированные плазмохимическим методом порошки природного графита приводит к тому, что электроды, полученные методами порошковой металлургии без связующих добавок, начинают расслаиваться, терять прочность.

Выводы

Исследован процесс формирования порошка терморасширенного графита, который был разделен на три стадии, описанные различными математическими моделями. Показано, что порошок хорошо формуется в широком диапазоне плотностей. Проведенные электрохимические исследования позволяют рекомендовать порошки ТРГ для изготовления электродов жидкостных конденсаторов.

Исследования, проведенные на кафедре «Технология и исследование материалов» и в лаборатории «Физическая химия», показали, что на электродах из терморасширенного графита формируется адсорбционный слой с высокой емкостью. Так, в смешанных сульфатно-бромидных растворах величина емкости составляет 1,0–1,5 Ф/см² видимой поверхности, что позволяет рекомендовать ТРГ к использованию в качестве электродного материала для обкладок жидкостных конденсаторов. Конденсаторы этого типа могут быть использованы в качестве накопительного элемента в импульсных емкостных накопителях энергии. Качество работы таких устройств определяется большими величинами разрядных токов, высокими значениями номинальной емкости и постоянной времени разряда, а также постоянством величины запасаемой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // *Технология машиностроения*. 2015. № 1. С. 11–16.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копяев В.Н. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.
3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2014. № 8. С. 40–45.
4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2013. № 3(178). С. 148–155.
5. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 2. С. 35–41.
6. Котов С.А., Батурова Л.П., Музафарова С.-В.Р., Сафронов Д.А. Исследование процессов получения высокопористых электродов из порошков терморасширенного графита // *Современные металлургические материалы и технологии (СММТ'17), XII Международная научно-техническая конференция*. 2017. С. 121–127.
7. Антонов А.Н., Тимонин В.А., Федосеев С.Д., Макевнина Л.Ф. Изучение условий формирования порошкообразных материалов без применения полимерных связующих // *ХТТ*. 1984. № 1. С. 114–117.
8. Караваев Д.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Трошков К.В. Определение насыпной плотности терморасширенного графита // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15, № 4. С. 360–362.
9. Черныш И.Г., Карпов И.И., Приходько Г.П. Физико-химические свойства графита и его соединений. Киев, 1990. С. 200.
10. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. Москва. Металлургия, 1987. 184 с.
11. Финаенов А.И., Шпак И.Е., Афонина А.В., Забудьков С.Л., Яковлев А.В. Терморасширенный графит в электродах химических источников тока // *Вестник СГТУ*, 2012. № 4. С. 107–112.
12. Уббеллоде А.Р., Льюис Ф.А. Графит и его кристаллические соединения. М.: Мир, 1965. 256 с.
13. Белова М.Ю. Графит, ИГ и ТРГ. [Электронный ресурс] 2007 // www.sealur.ru/pdf/useful/reports/grafit.pdf
14. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-Пресс, 1997. 718 с.
15. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. Ленинград: Химия, 1970. 608 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОТОВ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: Serkov51@mail.ru

МУЗАФАРОВА Светлана-Виктория Рустамовна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: redbeauty@rambler.ru

САФРОНОВ Дмитрий Алексеевич — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: gwagen0@gmail.com

БАТУРОВА Людмила Петровна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: baturova_lp@mail.ru

REFERENCES

- [1] Rudskoy A.I., Kondratyev S. Yu., Sokolov Yu.A. Algorithm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnyim luchom v vakuume. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)
- [2] Rudskoy A.I., Kondratyev S. Yu., Sokolov Yu.A., Kopyayev V.N. Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynogo sinteza izdeliy elektronnyim luchom. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. Т. 85. № 11. S. 91–96. (rus.)
- [3] Rudskoy A.I., Kondratyev S. Yu., Sokolov Yu.A. Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

- [4] Rudskoy A.I., Kondratyev S. Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU, Estestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)
- [5] Sokolov Yu.A., Kondratyev S. Yu., Lukyanov A.A. Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)
- [6] Kotov S.A., Baturova L.P., Muzafarova S.-V.R., Safronov D.A. Issledovaniye protsessov polucheniya vysokoporistykh elektrodov iz poroshkov termorasshirennogo grafita. *Sovremennyye metallicheskiye materialy i tekhnologii (SMMT'17), XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya*. 2017. S. 121–127. (rus.)
- [7] Antonov A.N., Timonin V.A., Fedoseyev S.D., Makevnina L.F. Izucheniye usloviy formirovaniya poroshkoobraznykh materialov bez primeneniya polimernykh svyazuyushchikh. *KhTT*. 1984. № 1. S. 114–117. (rus.)
- [8] Karavayev D.M., Makarova L. Ye., Degtyarev A.I., Troshkov K.V. Opredeleniye nasytnoy plotnosti termorasshirennogo grafita. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2013. T. 15. № 4. S. 360–362. (rus.)
- [9] Chernysh I.G., Karpov I.I., Prikhodko G.P. Fiziko-khimicheskiye svoystva grafita i yego soyedineniy. Kiyev, 1990. 200 s. (rus.)
- [10] Lozhechnikov Ye.B. Prokatka v poroshkovoy metallurgii. Moskva: Metallurgiya, 1987. 184 s.
- [11] Finayenov A.I., Shpak I. Ye., Afonina A.V., Zabudkov S.L., Yakovlev A.V. Termorasshirennyy grafit v elektrodakh khimicheskikh istochnikov toka. *Vestnik SGTU*. 2012. № 4. S. 107–112. (rus.)
- [12] Ubbelode A.R., Lyuis F.A. Grafit i yego kristallicheskiye soyedineniya. M.: Mir, 1965. 256 s. (rus.)
- [13] Belova M. Yu. Grafit. IG i TRG. [Electronnii resurs] 2007 // www.sealur.ru/pdf/useful/reports/grafit.pdf (rus.)
- [14] Fialkov A.S. Uglerod, mezhsloyevyye soyedineniya i kompozity na yego osnove. M.: Aspekt-Press, 1997. 718 s. (rus.)
- [15] Skorchelletti V.V. Teoreticheskaya elektrokimiya. Leningrad: Khimiya, 1970. 608 s. (rus.)

AUTHORS

KOTOV Sergei A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: Serkotov51@mail.ru

MUZAFAROVA Svetlana-Viktorii R. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: redbeauty@rambler.ru

SAFRONOV Dmitrii A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: gwagen0@gmail.com

BATUROVA Ludmila P. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: baturova_lp@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 8 ноября 2017 г.