

Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 4. С. 188–196

Electrochemical Energetics, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 188–196

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-188-196>, EDN: SMCTZS

Научная статья

УДК 544.643

АНОДЫ НА ОСНОВЕ NiO/C ДЛЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Н. М. Леонова[✉], А. М. Леонова, О. А. Баширов, А. В. Суздальцев

Уральский федеральный университет, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28

Леонова Наталия Максимовна, младший научный сотрудник лаборатории электрохимических материалов и технологий, n.m.leonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1016-8977>

Леонова Анастасия Максимовна, младший научный сотрудник лаборатории электрохимических материалов и технологий, a.m.leonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5900-7045>

Баширов Олег Андреевич, инженер лаборатории электрохимических материалов и технологий, bashirov.oleg@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5509-8816>

Суздальцев Андрей Викторович, доктор химических наук, заведующий лабораторией электрохимических материалов и технологий, a.v.suzdaltsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3004-7611>

Аннотация. В настоящее время ведется активный поиск анодного материала для литий-ионных источников тока (ЛИИТ). Потенциально возможными материалами ЛИИТ являются оксиды переходных металлов (SnO₂, NiO и другие). В работе методом термического разложения Ni(CH₃COO)₂·4H₂O получен субмикронный порошок NiO, изготовлен композитный анод NiO/C и изучено его поведение при многократном циклировании в составе анодного полуэлемента ЛИИТ. Показана работоспособность данного анодного материала и определены его основные энергетические характеристики. После 40 циклов разрядная емкость анода NiO/C составила 355 мА·ч/г при токе C/10 и кулоновской эффективности 99–100%.

Ключевые слова: литий-ионные источники тока, оксид никеля, композитный материал, анодный материал, кулоновская эффективность, разрядная емкость

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-03-2023-006 от 16.01.2023, FEUZ-2020-0037).

Для цитирования: Леонова Н. М., Леонова А. М., Баширов О. А., Суздальцев А. В. Аноды на основе NiO/C для литий-ионных источников тока // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 4. С. 188–196. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-188-196>, EDN: SMCTZS

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

NiO/C-based anodes for lithium-ion current sources

N. M. Leonova[✉], A. M. Leonova, O. A. Bashirov, A. V. Suzdaltsev

Уральский федеральный университет, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28

Natalia M. Leonova, n.m.leonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1016-8977>

Anastasia M. Leonova, a.m.leonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5900-7045>

Oleg A. Bashirov, bashirov.oleg@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5509-8816>

Andrey V. Suzdaltsev, a.v.suzdaltsev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3004-7611>

Abstract. Nowadays, the active search for an anode material, which can be used in lithium-ion current sources, takes place. The potential anode materials are transition metal oxides (SnO₂, NiO and others). In this work, submicron NiO powder was obtained using the thermal decomposition of Ni(CH₃COO)₂·4H₂O. Besides, a NiO/C composite anode was fabricated and its behavior in the anode half-cell of lithium-ion current source was studied during multiple cycling. The workability of the anode material was shown and its main energy

characteristics were determined. The discharge capacity of the NiO/C anode was 355 mA·h/g at the current of C/10 and Coulomb efficiency was 99–100% after 40 cycles.

Keywords: lithium-ion current sources, nickel oxide, composite material, anode material, Coulomb efficiency, discharge capacity

Acknowledgments. This work was carried out in the frame of the State Assignment number 075-03-2023-006 dated 16.01.2023 (the theme number FEUZ-2020-0037).

For citation: Leonova N. M., Leonova A. M., Bashirov O. A., Suzdaltsev A. V. NiO/C-based anodes for lithium-ion current sources. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 188–196 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-4-188-196>, EDN: SMCTZS

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует острая потребность в разработке устройств хранения энергии с улучшенными характеристиками. Одними из таких устройств считаются литий-ионные источники тока [1]. Для улучшения их характеристик ведется активный поиск новых электролитов и электродных материалов. Несмотря на низкую стоимость, незначительное объемное расширение и высокую электропроводность, анодные материалы на основе графита имеют низкую скорость заряда, невысокую емкость и плотность энергии.

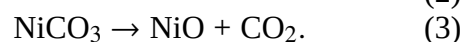
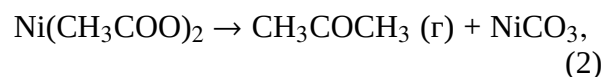
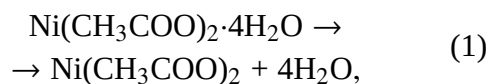
Альтернативными анодными материалами выступают оксиды переходных металлов [1, 2], композитные материалы на основе кремния [3, 4], олова [5] и германия [6, 7]. Одним из препятствий использования вышеперечисленных материалов в составе ЛИИТ является их высокое объемное расширение (до 300% для кремния и до 100% для оксидов переходных металлов) [8], которое может быть скомпенсировано за счет изготовления композиционных смесей с субмикронными и наноразмерными частицами активного анодного материала. В связи с этим актуальным представляется поиск как материалов указанного размера, так и простых и дешевых способов их получения.

В данной работе изучена возможность использования композитного анода на основе NiO с электропроводящей добавкой углерода в литий-ионных источниках тока. Выбор оксида никеля обусловлен тем, что он является химически устойчивым, широко

ко распространенным в природе и дешевым материалом. При этом для синтеза оксида никеля выбран наиболее простой и дешевый метод термического разложения солей никеля [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение NiO. Синтез порошка NiO осуществляли методом термического разложения в атмосфере воздуха. Исходный $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ подвергали дегидратации и термическому разложению при температуре выше 160°C по реакциям [9, 10]



Полученный образец использовали для изготовления активного анодного материала в ЛИИТ.

Анализ морфологии и состав. Химический и фазовый состав реагентов и продуктов определяли методом рентгенофазового анализа (XRD) с использованием дифрактометра Tongda TDM-20 (Tongda, Китай). Морфологию и элементный состав полученного образца исследовали с помощью электронного микроскопа Tescan Vega 4 (Tescan, Чешская республика) с детектором Xplore 30 EDS (Oxford, Великобритания). Средний размер частиц измеряли с помощью анализатора частиц Bettersizer S3 Plus (Bettersizer, Китай).

Электрохимические исследования. Электрохимические характеристики анода NiO/C были исследованы в полуэлементе с использованием трехэлектродной ячейки [11]. Для этого смесь компонентов (мас.%) 75NiO-15C-10PVdF-NMP наносили на сетку из нержавеющей стали в виде суспензии. Полуэлементы изготавливали в герметичном перчаточном боксе с инертной атмосферой (O_2 , $H_2O < 0.1$ ppm). В качестве рабочего электрода использовали нанесенную на стальную сетку суспензию с NiO, вспомогательным электродом и электродом сравнения служила литиевая фольга. Все электроды были разделены сепараторами и помещены в фторопластовую ячейку. Ячейка была заполнена 1 мл электролита – 1M LiPF₆ в смеси EC/DMC/DEC (1:1:1 по объему). Электрохимические измерения и циклирование проводили с использованием потенциостата Zive-SP5 (WonATech, Республика Корея) и потенциостата-гальваностата P-20X8 (Electrochemical Instruments, Россия).

Для изучения анодного материала была получена серия циклических вольтамперограмм (ЦВА) при скорости сканирования 0.1 мВ/с в диапазоне потенциалов от 0.01 до 3 В (отн. Li/Li⁺) и выполнено циклирование образца в гальваностатическом режиме. Заряд и разряд проводили до 0.01 и до 3 В (отн. Li/Li⁺) соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики образца. На рис. 1 приведена микрофотография полученного NiO. Порошок представлял собой частицы кубической формы со средним размером грани 0.5 мкм, которые, согласно распределению частиц по размерам, образовывали более крупные агломераты размером до 2–3 мкм. Содержание элементов в образце составило, мас. %: O – 16.39; Ni – 83.16. По данным XRD анализа, образец являлся однофазным и обладал гранецентрированной кубической кристаллической структурой.

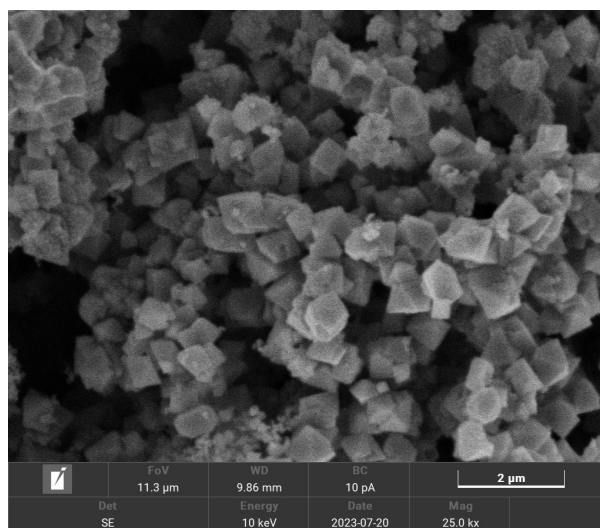
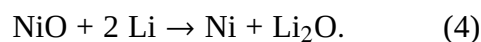


Рис. 1. Микрофотография порошка NiO, полученного методом термического разложения

Fig. 1. The micrograph of NiO powder obtained by the thermal decomposition method

Энергетические характеристики анодного материала NiO/C. На рис. 2, а приведены ЦВА при скорости сканирования 0.1 мВ/с для первых 6 циклирований образца. В процессе первого разряда происходит ряд необратимых реакций, связанных с разложением электролита и образованием слоя SEI, что приводит к большой начальной необратимой емкости и низкой кулоновской эффективности. При первом катодном сканировании наблюдается пик при 0.56 В (отн. Li/Li⁺), предположительно соответствующий восстановлению NiO до Ni [12]:



Образование аморфных пленок Li₂O и SEI может привести к необратимой потере емкости. Анодный пик при потенциале около 2.18 В соответствует обратимому окислению Ni до NiO и разложению Li₂O до лития и кислорода [3, 4]. На последующих циклах наблюдаются сдвиги потенциалов катодных/анодных пиков, связанные с увеличением расхода лития или морфологическими изменениями в образце во время первого литирования [3, 4].

На рис. 2, б показаны первые шесть зарядно-разрядных характеристик образца

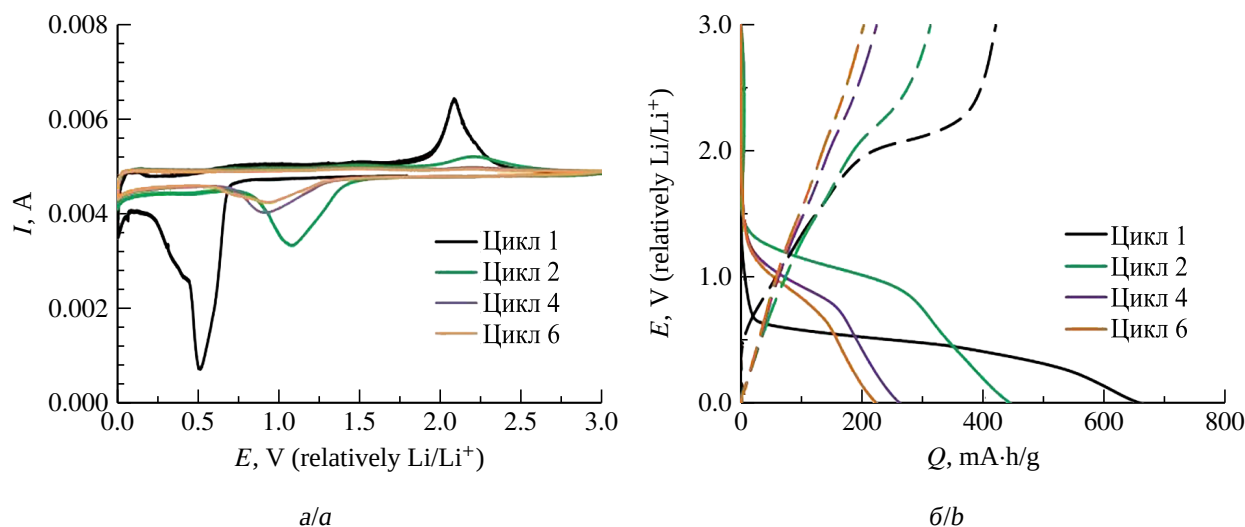


Рис. 2. ЦВА первых шести циклов образца NiO/C при скорости сканирования 0.1 мВ/с (а) и гальваностатические зарядные/разрядные зависимости (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. The CV(cyclic voltammogram) of the first six cycles of the NiO/C sample at the scan rate of 0.1 mV/s (a) and galvanostatic charge/discharge dependencies (b) (color online)

NiO/C. На 1-м цикле разрядное плато находится при потенциале 0.56 В, это объясняется восстановлением NiO до Ni, а также образованием Li₂O и слоя SEI. Зарядное плато около 2.18 В представляет собой окисление Ni до NiO, восстановление Li₂O до Li. Таким образом, механизм заряда-разряда согласуется с результатом ЦВА. На 1-м цикле емкость исследуемого образца NiO составила 426 мА·ч/г, а кулоновская эффективность – 64%. При последующих 5 циклированиях наблюдается снижение емкости, указывающее на изменение объема NiO и деградацию анодного материала.

На рис. 3, а приведено изменение разрядной емкости и кулоновской эффективности образца в ходе дальнейшего циклирования. Как видно из полученных данных, наблюдается рост емкости до 355 мА·ч/г к 40-му циклу при кулоновской эффективности 99–100%. Улучшение характеристик можно объяснить тем, что графит обеспечивает пространство для изменения объема частиц NiO, а также препятствует образованию слоя SEI на субмикронных частицах NiO [13]. Увеличение емкости также может быть обусловлено измельчением частиц

NiO и образованием свежей электрохимически активной поверхности оксида [14].

Характеристики анода при различных скоростях заряда/разряда приведены на рис. 3, б. Начальная разрядная емкость исследуемого образца при скоростях разряда C/5, C/2, C и 2C составила 300, 245, 200 и 155 мА·ч/г соответственно. При последующем снижении плотности тока (скорости разряда) с 2C до C/5 разрядная емкость образца восстанавливается до 312 мА·ч/г. Образец имеет стабильную разрядную емкость при любой плотности тока, что указывает на высокую обратимость реакции конверсии [15].

На рис. 3, в показана разрядная емкость образца и кулоновская эффективность в ходе многократного циклирования при скорости разряда C. Образец демонстрирует стабильность разрядной емкости 200 мА·ч/г при сохранении кулоновской эффективности выше 98% после ста циклов, что указывает на стабильную работу анодного материала даже при высоких скоростях заряда-разряда.

Для более детального изучения кинетики заряда и разряда исследуемого образца

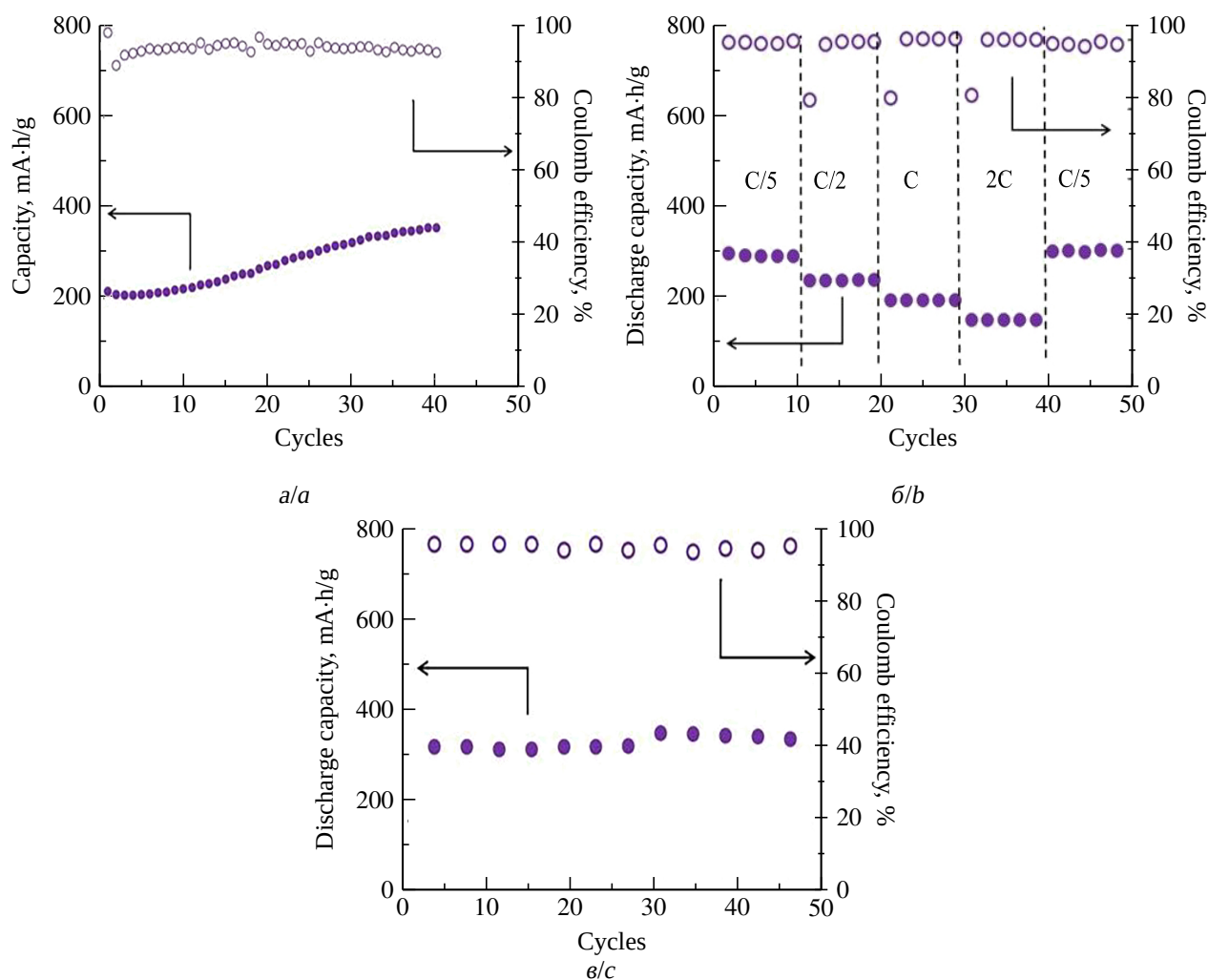


Рис. 3. Характеристики электрода разрядным током $C/10$ при многократном циклировании (а); при циклировании разными разрядными токами (б); при циклировании разрядным током C (в)

Fig. 3. The characteristics of the electrode with discharge current of $C/10$ at multiple cycling (a); at cycling with different discharge currents (b); at cycling with discharge current C (c)

были получены ЦВА при различных скоростях сканирования в диапазоне потенциалов от 0.01 до 3.0 В (отн. Li/Li^+).

Как видно из рис. 4, а, величина тока пика повышается, а пик становится шире по оси потенциалов с увеличением скорости сканирования. Потенциалы пиков в катодной области смещаются в сторону более отрицательных значений, тогда как потенциалы пиков в анодной области – в область более положительных. Увеличение площади пиков окисления при увеличении скорости сканирования может указывать на возмож-

ность активационного процесса или частичного разложения SEI на поверхности электродных материалов [16]. В катодной области наблюдаются 2 пика: восстановление Ni при $\sim 0.5 - 1.0$ В и восстановление Li при потенциале отрицательнее 0.1 В. Соответственно, в анодной области формируются 2 пика: окисление Li при 0.1–0.5 В, окисление Ni при 1.5–2.5 В.

Для оценки лимитирующих стадий ЦВА были перестроены в координатах Тафеля. Связь между током пика, константой a и скоростью сканирования показана в урав-

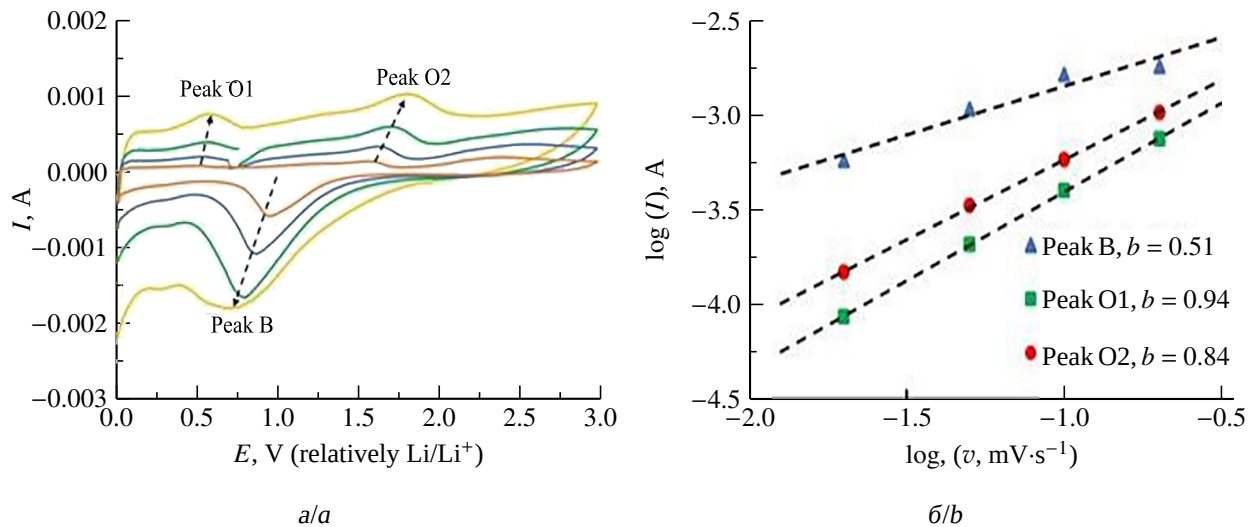


Рис. 4. Циклические вольтамперные зависимости при разных скоростях циклирования (а); зависимость $\log(I)$ - $\log(v)$ для исследуемого образца NiO (б)
 Fig. 4. Cyclic voltammetric dependencies at different cycling rates (a); $\log(I)$ - $\log(v)$ dependence for the NiO sample under study (b)

нениях (5) и (6) [17, 18]:

$$i = av^b, \quad (5)$$

$$\log(i) = b \log(v) + \log(a), \quad (6)$$

где a и b – константы; i – ток пика, А; v – скорость сканирования, мВ/с. В случае $b = 0.5$ исследуемый процесс преимущественно протекает в диффузионном режиме, в случае $b = 1$ процесс является емкостным. Последний особенно привлекателен, благодаря стабильности и более быстрой скорости заряда [20]. Как показано на рис. 4, б, значения b для катодного пика R, анодных пиков O1 и O2 составляют 0.51, 0.94 и 0.84 соответственно. Эти результаты показывают, что для накопления заряда Li^+ на электродах протекает смешанный процесс [17, 18]. Величина пика O2 значительно выше, чем других пиков, что обусловлено значительным внедрением ионов Li^+ в NiO после восстановительного пика R [17, 18].

Оценка долей емкостного и диффузионного вкладов в процесс заряда анодного образца может быть осуществлена путем решения уравнения [19]

$$i = k_1v + k_2v^{0.5}, \quad (7)$$

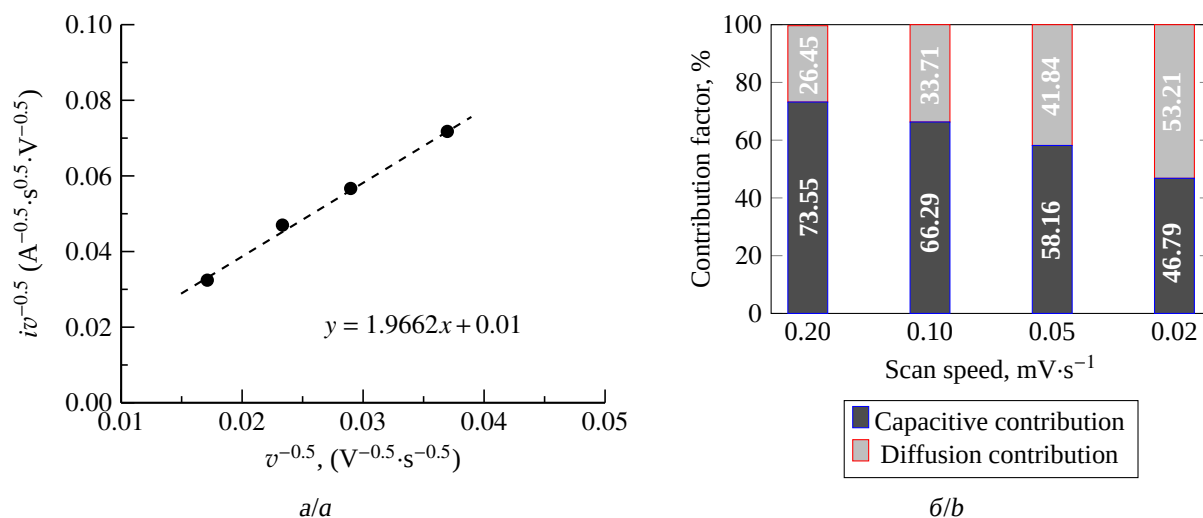
где i – ток при потенциале анодного пика, А; v – скорость сканирования, мВ/с; k_1v и $k_2v^{0.5}$ – доли емкостного и диффузионного вклада в общий ток заряда [18–20].

Уравнение (7) может быть преобразовано к линейному виду:

$$iv^{-0.5} = k_1v^{0.5} + k_2. \quad (8)$$

Далее значения k_1 и k_2 могут быть получены из уравнения линейной регрессии зависимости $iv^{-0.5}$ - $v^{0.5}$ (рис. 5) согласно уравнению (8) [18].

Доли вклада в зависимости от скорости сканирования приведены на рис. 5, б. Емкостной вклад при скоростях сканирования 0.02, 0.05, 0.1 и 0.2 мВ/с составил 46.79, 58.16, 66.29, 73.55%. Согласно полученным данным, у исследуемого образца наблюдается преимущественно емкостной вклад. Это объясняется тем, что в состав анода входит углерод, который может выступать в роли акцептора электронов, тем самым повышая емкость межфазного двойного слоя. Также большое количество кислородсодержащих групп может обеспечить больше мест для поверхностных реакций и эффективно увеличить вклад псевдоемкости.

Рис. 5. График зависимости $iv^{-0.5}-v^{0.5}$ (а); доля вклада от скорости сканирования (б)Fig. 5. The graph of $iv^{-0.5}-v^{0.5}$ dependence (a); fractional of contribution from scanning speed (b)

Приведенные результаты указывают на принципиальную возможность использования субмикронного порошка NiO, полученного методом термического разложения ацетата никеля, для изготовления анодов ЛИИТ с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Дальнейшая работа будет направлена как на оптимизацию параметров синтеза порошка NiO, так и на оптимизацию состава композитного анода NiO/C с целью повышения его емкости и стабильности при циклировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе путем термического разложения ацетата никеля был синтезирован субмикронный порошок оксида никеля с частицами кубической формы и средним размером около 3 мкм, который был использован для изготовления экспериментального образца анодного полуэлемента литий-ион-

ного источника тока с композитным анодом NiO/C.

Исследовано электрохимическое поведение порошка NiO в составе анодного полуэлемента ЛИИТ. При циклировании током C/10 отмечено постепенное увеличение разрядной емкости до 355 мА·ч/г к 40-му циклу при сохранении кулоновской эффективности циклирования на уровне выше 98%. Показана также стабильность работы материала в ходе многократного циклирования при токах разряда до 1С. Сделано предположение, что такое поведение связано с активацией анодного материала за счет измельчения частиц NiO, при этом вероятное расширение оксида никеля компенсируется частицами графита.

Изучена кинетика процесса заряда и разряда образца анодного материала NiO/C. Показано, что заряд образца протекает в условиях смешанного режима, при этом емкостной вклад является преобладающим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 111–120. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120>

2. Zhou G., Ding W., Wang T., Liu Ch., Zhang L., Yin J., Fu Yo. Progress of NiO-based anodes for high-performance Li-ion batteries // The Chem. Record. 2022. Vol. 22. Article number e202200111. <https://doi.org/10.1002/tcr.202200111>

3. Чemezov O. B., Исаков A. B., Анисаров A. П., Брежестовский M. C., Бушкова O. B., Баталов H. H., Зайков Ю. П., Шашкин A. П. Электролитическое получение нановолокон кремния из расплава $KCl-KF-K_2SiF_6-SiO_2$ для композиционных анодов литий-ионных аккумуляторов // *Электрохимическая энергетика*. 2013. Т. 13, № 4. С. 201–204.
4. Леонова H. M., Леонова A. M., Баширов O. A., Лебедев A. C., Трофимов A. A., Суздальцев A. B. Аноды на основе C/SiC для литий-ионных источников тока // *Электрохимическая энергетика*. 2023. Т. 23, № 1. С. 41–50. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-1-41-50>
5. Иванищев A. B. Подходы к созданию электродов на основе интеркаляционных соединений лития // *Электрохимическая энергетика*. 2018. Т. 18, № 2. С. 51–76. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2018-18-2-51-76>
6. Кулова T. Л., Скундин A. M. Применение германия в литий-ионных и натрий-ионных аккумуляторах (Обзор) // *Электрохимия*. 2021. Т. 57, № 12. С. 709–742. <https://doi.org/10.31857/S0424857021110050>
7. Chockla A. M., Klavetter K. C., Mullins C. B., Korgel B. A. Solution-grown germanium nanowire anodes for lithium-ion batteries // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2012. Vol. 4. P. 4658–4664. <https://doi.org/10.1021/am3010253>
8. Ates M. N. Understanding the effect of deposition potential on the electrodeposited tin anodes for lithium-ion batteries // *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2023. Vol. 13. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.21597/jist.1264079>
9. Bani-Fwaz M. Z., El-Zahhar A. A., Abd-Rabboh H. S. M., Hamdy M. S., Shkir M. Synthesis of NiO nanoparticles by thermal routes for adsorptive removal of crystal violet dye from aqueous solutions // *Int. J. Env. Anal. Chem.* 2019. Vol. 101. P. 1126–1144. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1678599>
10. Jesus J. C. De, Gonzales, Quevedo A., Puerta T. Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques // *J. Mol. Cat. A : Chem.* 2005. Vol. 228. P. 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2004.09.065>
11. Trofimov A. A., Leonova A. M., Leonova N. M., Gevel T. A. Electrodeposition of silicon from molten $KCl-K_2SiF_6$ for lithium-ion batteries // *J. Electrochem. Soc.* 2022. Vol. 169. Article number 020537. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac4d6b>
12. Liu X., Or S. W., Jin Ch., Lv Ya., Feng Ch., Sun Yu. NiO/C nanocapsules with onion-like carbon shell as anode material for lithium ion batteries // *Carbon*. 2013. Vol. 60. P. 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.014>
13. Siddiqui S.-E-T., Rahman Md. A., Kim J.-H., Sharif S. B., Paul S. A Review on recent advancements of Ni-NiO nanocomposite as an anode for high-performance lithium-ion battery // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. Article number 2930. <https://doi.org/10.3390/nano12172930>
14. Jo M. S., Ghosh S., Jeong S. M., Kang Yu. Ch., Cho J. S. Coral-like yolk-shell structured nickel oxide/carbon composite microspheres for high-performance Li-ion storage anodes // *Nano-Micro Lett.* 2019. Vol. 11. Article number 3. 18 p. <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0234-0>
15. Jiang Sh., Mao M.-M., Pang M.-J., Yang H., Wang R.-W., Li N., Pan Q.-L., Pang M., Zhao J.- G. Preparation and performance of a graphene-(Ni-NiO)-C hybrid as the anode of a lithium-ion battery // *New Carb. Mater.* 2023. Vol. 38. P. 356–365. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(22\)60647-4](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(22)60647-4)
16. Du D., Lan R., Xie K., Wang H., Tao Sh. Synthesis of $Li_2Ni_2(MoO_4)_3$ as a high-performance positive electrode for asymmetric supercapacitors // *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. P. 13304–13311. <https://doi.org/10.1039/c6ra28580e>
17. Dai H., Zhang R., Zhong M., Guo Sh. Effects of the inherent tubular structure and graphene coating on the lithium ion storage performances of electrospun NiO/Co nanotubes // *J. Phys. Chem.* 2020. Vol. 124. P. 143–151. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b09716>
18. Leonova A. M., Bashirov O. A., Leonova N. M., Lebedev A. S., Trofimov A. A., Suzdaltsev A. V. Synthesis of C/SiC mixtures for composite anodes of lithium-ion power sources // *Applied Science*. 2022. Vol. 13, iss. 2. Article number 901. <https://doi.org/10.3390/app13020901>
19. Mohammadi A., Arsalani N., Tabrizi A. G., Moosavifard S. E., Naqshbandi Zh., Ghadimi L. S. Engineering rGO-CNT wrapped Co_3S_4 nanocomposites for high-performance asymmetric supercapacitors // *Chem. Eng. Journal*. 2018. Vol. 334. P. 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.029>
20. Augustyn V., Simon P., Dunn B. Pseudocapacitive oxide materials for high-rate electrochemical energy storage // *Energy Env. Sci.* 2013. Vol. 7. P. 1597–1614. <https://doi.org/10.1039/c3ee44164d>

REFERENCES

1. Kulova T. L., Skundin A. M. Problems of development of lithium-ion batteries all over the world and in Russia. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 111–120 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-111-120>
2. Zhou G., Ding W., Wang T., Liu Ch., Zhang L., Yin J., Fu Yo. Progress of NiO-based anodes for high-performance Li-ion batteries. *The Chem. Record*, 2022, vol. 22, article no. e202200111. <https://doi.org/10.1002/tcr.202200111>

3. Chemezov O. V., Isakov A. V., Apisarov A. P., Brezhestovskii M. S., Bushkova O. V., Batalov N. N., Zaikov Yu. P., Shashkin A. P. Electrolytic production of silicon nanofibers from a KCl–KF–K₂SiF₆–SiO₂ melt for composite anodes of lithium-ion batteries. *Electrochemical Energetics*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 201–204 (in Russian).
4. Leonova N. M., Leonova A. M., Bashirov O. A., Lebedev A. S., Trofimov A. A., Suzdal'tsev A. V. Anodes based on C/SiC for lithium-ion current sources. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 41–50 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-1-41-50>
5. Ivanishchev A. V. Approaches to the creation of electrodes based on lithium intercalation compounds. *Electrochemical Energetics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 51–76 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2018-18-2-51-76>
6. Kulova T. L., Skundin A. M. Germanium in lithium-ion and sodium-ion batteries (A review). *Russ. J. Electrochem.*, 2021, vol. 57, no. 12, pp. 709–742 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0424857021110050>
7. Chockla A. M., Klavetter K. C., Mullins C. B., Korgel B. A. Solution-grown germanium nanowire anodes for lithium-ion batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, vol. 4, pp. 4658–4664. <https://doi.org/10.1021/am3010253>
8. Ates M. N. Understanding the effect of deposition potential on the electrodeposited tin anodes for lithium-ion batteries. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2023, vol. 13, pp. 1804–1813. <https://doi.org/10.21597/jist.1264079>
9. Bani-Fwaz M. Z., El-Zahhar A. A., Abd-Rabboh H. S. M., Hamdy M. S., Shkir M. Synthesis of NiO nanoparticles by thermal routes for adsorptive removal of crystal violet dye from aqueous solutions. *Int. J. Env. Anal. Chem.*, 2019, vol. 101, pp. 1126–1144. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1678599>
10. Jesus J. C. De, Gonzales, Quevedo A., Puerta T. Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques. *J. Mol. Cat. A : Chem.*, 2005, vol. 228, pp. 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2004.09.065>
11. Trofimov A. A., Leonova A. M., Leonova N. M., Gevel T. A. Electrodeposition of silicon from molten KCl–K₂SiF₆ for lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 2022, vol. 169, article no. 020537. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac4d6b>
12. Liu X., Or S. W., Jin Ch., Lv Ya., Feng Ch., Sun Yu. NiO/C nanocapsules with onion-like carbon shell as anode material for lithium ion batteries. *Carbon*, 2013, vol. 60, pp. 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.014>
13. Siddiqui S.-E.-T., Rahman Md. A., Kim J.-H., Sharif S. B., Paul S. A Review on recent advancements of Ni-NiO nanocomposite as an anode for high-performance lithium-ion battery. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, article no. 2930. <https://doi.org/10.3390/nano12172930>
14. Jo M. S., Ghosh S., Jeong S. M., Kang Yu. Ch., Cho J. S. Coral-like yolk-shell structured nickel oxide/carbon composite microspheres for high-performance Li-ion storage anodes. *Nano-Micro Lett.*, 2019, vol. 11, article no. 3. 18 p. <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0234-0>
15. Jiang Sh., Mao M.-M., Pang M.-J., Yang H., Wang R.-W., Li N., Pan Q.-L., Pang M., Zhao J.- G. Preparation and performance of a graphene-(Ni-NiO)-C hybrid as the anode of a lithium-ion battery. *New Carb. Mater.*, 2023, vol. 38, pp. 356–365. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(22\)60647-4](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(22)60647-4)
16. Du D., Lan R., Xie K., Wang H., Tao Sh. Synthesis of Li₂Ni₂(MoO₄)₃ as a high-performance positive electrode for asymmetric supercapacitors. *RSC Adv.*, 2017, vol. 7, pp. 13304–13311. <https://doi.org/10.1039/c6ra28580e>
17. Dai H., Zhang R., Zhong M., Guo Sh. Effects of the inherent tubular structure and graphene coating on the lithium ion storage performances of electrospun NiO/Co nanotubes. *J. Phys. Chem.*, 2020, vol. 124, pp. 143–151. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b09716>
18. Leonova A. M., Bashirov O. A., Leonova N. M., Lebedev A. S., Trofimov A. A., Suzdal'tsev A. V. Synthesis of C/SiC mixtures for composite anodes of lithium-ion power sources. *Applied Science*, 2022, vol. 13, iss. 2, article no. 901. <https://doi.org/10.3390/app13020901>
19. Mohammadi A., Arsalani N., Tabrizi A. G., Moosavifard S. E., Naqshbandi Zh., Ghadimi L. S. Engineering rGO-CNT wrapped Co₃S₄ nanocomposites for high-performance asymmetric supercapacitors. *Chem. Eng. Journal*, 2018, vol. 334, pp. 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.029>
20. Augustyn V., Simon P., Dunn B. Pseudocapacitive oxide materials for high-rate electrochemical energy storage. *Energy Env. Sci.*, 2013, vol. 7, pp. 1597–1614. <https://doi.org/10.1039/c3ee44164d>

Поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 04.09.2023
 The article was submitted 12.10.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accepted for publication 04.09.2023