



МРНТИ 31.15.33

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-149-4-57-66>

Научная статья

Переработка пластиковых бутылок в твердый углерод для литий-ионных аккумуляторов

Д. Ескожа^{1*} , А. Жанайхан² , А. Сарсенгалиева³ , Л. Кусепова⁴ ,
Г. Тажкенова⁵ , А. Нурпейсова⁶ 

^{1,2,3,6}Институт аккумуляторов, Астана, Казахстан

^{2,3,4,5}Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁶Национальная лаборатория Астана, Астана, Казахстан

(E-mail: ¹dos.eskozha@gmail.com, ²aisha.zhanaikhan@gmail.com,
³saizhuzzaa@gmail.com, ⁴kusepova71@mail.ru, ⁵gaukhar-1970@mail.ru,
⁶arailym.nurpeissova@nu.edu.kz)

Аннотация. Проблема увеличения объема пластиковых отходов становится все более актуальной в связи с ростом производства пластиковых изделий для упаковки, бытовых целей, а также применением полимеров в текстильной промышленности, строительстве, медицине и многих других сферах. Пластиковые предметы занимают значительную долю загрязняющих веществ на суше и море. В ходе данного исследования был проведен анализ полиэтилентерефталата (ПЭТФ), полученного из одноразовых бутылок, как потенциальное сырье для производства анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) ввиду его высокого наличия углерода и большого количества эфирных связей.

Электрохимические исследования указали, что аноды на основе полиэтилентерефталата с модифицированной поверхностью PЕТ-ДН обладают выдающимися характеристиками хранения лития. Аноды PЕТ-ДН демонстрируют стабильно высокую удельную емкость после многократных циклов зарядки-разрядки, что свидетельствует о перспективности их использования в долговечных ЛИА.

Ключевые слова: растворители, твердый углерод, анодный материал для ЛИА.

Поступила: 16.09.2024. Одобрена: 19.12.2024. Доступна онлайн: 31.12.2024.

* Автор-корреспондент

Введение

Одним из наиболее негативных результатов антропогенной деятельности является образование отходов, среди которых отходы пластмасс занимают особое место в силу своих уникальных свойств [1-3].

Широкое использование пластиковых изделий для бытовых и промышленных нужд объясняется их лёгкостью, экономичностью и набором ценнейших служебных свойств. В настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов обретает актуальное значение не только с позиций охраны окружающей среды, но и в связи с тем, что в условиях дефицита полимерного сырья пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом [4].

Наиболее стремительно растущий в настоящее время сегмент полимерной упаковочной индустрии – производство ПЭТФ-упаковки. Полиэтилентерефталат – продукт поликонденсации терефталевой кислоты. На данный момент он занимает ведущее место среди упаковочных материалов, тара из ПЭТФ отличается прозрачностью, лёгкостью, прочностью, высокой герметичностью. Из ПЭТФ изготавливают многообразные бутылки, пленки, которые применяют в пищевой промышленности, аморфные ПЭТФ-пленки и тому подобное. Учитывая такую широкую номенклатуру изделий из этого материала, становится понятным вопрос относительно утилизации использованной упаковки [5-7]. Переработка неразлагаемых пластиков в ценные углеродные материалы является одним из перспективных направлений решения этой проблемы. Однако большинство пластиков не содержат углеродных остатков или превращаются в графит с высоким содержанием углерода во время пиролиза из-за отсутствия кислородсодержащих функциональных групп. В связи с этим в качестве объекта исследования были выбраны отходы пластика ПЭТФ, обладающие высоким содержанием эфирных связей, которые могут быть непосредственно преобразованы в твердый углерод [8].

Наличие функциональных групп на поверхности материала, преимущественно кислородсодержащих, может приводить к увеличению его щелочности и расширению сферы применения. Дальнейшее исследование изменений структур, происходящих с углеродным материалом в процессе пиролиза и последующей активации, позволит выявить дополнительные возможности его использования.

При синтезе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) для получения анодного материала для ЛИА выбор растворителя может существенно повлиять на свойства конечного материала и на его производительность. 1,1,1,3,3,3 -гексафтор-2-пропанол обладает отличной растворимостью для терефталевой кислоты и может способствовать получению высококачественного ПЭТФ с однородной молекулярной массой. Это может улучшить свойства анодного материала, такие, как электропроводность и стабильность.

Материалы и методы

Подготовка материалов

Начальным этапом получения анодного материала для ЛИА был выбор ПЭТФ-бутылок. Бутылки были порезанные на мелкие пластины и промыты этанолом, после чего были высушены в вакуумной печи в течение суток.

Измельченный пластик был растворен в смеси. Для растворения пластика использовали смеси растворителей 1,1,1,3,3,3 -гексафтор-2-пропанол (ГФИП) и трифторуксусной кислоты (ТФУ), и дихлорметан (ДХМ) и трифторуксусной кислоты (ТФУ) в объемных соотношениях 7:3, с массовой долей пластика в растворе 20%.

Растворители были выбраны исходя из реологических показателей продуктового раствора, изученных в работе [9]. Полученные в результате растворения образцы были наименованы путем обозначения состава смесей растворителей (DH для смеси ДХМ и ГФИП и DT для смеси ДХМ и ТФУ) и их соотношений («73» для обозначения 7:3) с последующим указанием соотношения массы ПЭТФ в объем растворителя («2-20» для обозначения 2 грамм ПЭТФ в 20 мл смеси растворителей). Магнитная мешалка использовалась при 100 об/мин в течение 4 часов, после чего оставляли высушиваться на воздухе в течение 12 часов. Высушенные образцы перекладывали в керамические тигли и отправлялись в трубчатую печь для дальнейшего этапа прокали в атмосфере аргона при 750°C.

Полный процесс получения твердого углерода из ПЭТФ изображена на рисунке 1.



Рисунок 1. Процесс карбонизации ПЭТФ

Электрохимические анализы

Рабочий электрод был изготовлен при использовании поливинилиденфторид (ПВДФ), N-метил-2-пирролидона (НМП) и ацетиленовый черный при комнатной температуре. Гальваностатический анализ заряд-разряда углеродных анодных материалов позволил изучить электрохимические характеристики данных электродных материалов.

Результаты и обсуждение

Как видно на рисунке 2а и 2б, рентгенограммы всех образцов имеют схожий вид. Положение и полуширокая форма пиков хорошо согласуются с полученными результатами для аморфного углерода.

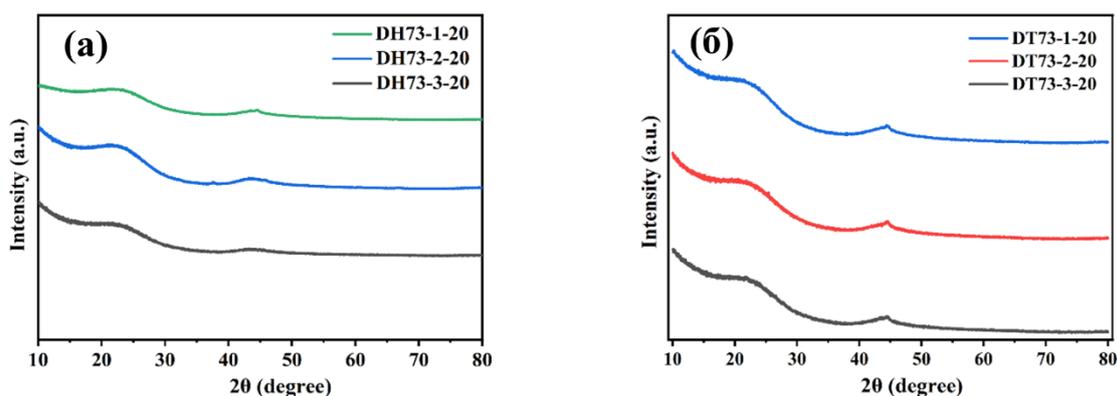


Рисунок 2. Рентгенограмма образцов, растворенных в: а) ГФИП; б) ДХМ

Рамановская спектроскопия была применена для исследования изменений в структуре материала. На рисунке 3 представлены Рамановские спектры углеродного материала DH-73-2-20 (ПЭТФ). Спектр соответствует профилю необработанного ПЭТФ,

что указывает на отсутствие разрушения структуры ПЭТФ при растворении в смеси растворителей и свидетельствует о том, что полученные образцы не содержат растворителя. Анализ карбонизированного образца методом Рамановской спектроскопии выявил два доминирующих пика: 1353 см^{-1} (D) и 1607 см^{-1} (G) для образца ДН-73-2-20. Пик D, связанный с дефектами в структуре, обусловлен внеплоскостными колебаниями, которые возникают из-за беспорядка и дефектов в слоях графена, пик G соответствует высокоупорядоченной графитовой углеродной структуре.

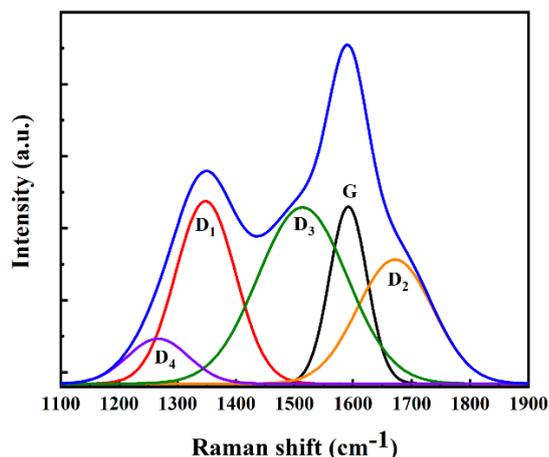


Рисунок 3. Рамановские спектры образца ДН-73-2-20

На рисунке 4 представлены результаты СЭМ, которые показали, что углеродные материалы, полученные из ПЭТФ в ГФИП и ДХМ, имеют схожую морфологию, что указывает на отсутствие видимых различий в их структуре. В обоих случаях наблюдаются аналогичные текстуры поверхности, распределение пор и форма частиц. Тем не менее углеродные аноды, полученные из ГФИП, демонстрируют лучшую электродную активность. Это предполагает, что факторы, не связанные непосредственно с видимой морфологией, такие, как химический состав, микроструктурные особенности или степень графитизации, могут играть более значимую роль в определении производительности анодов.

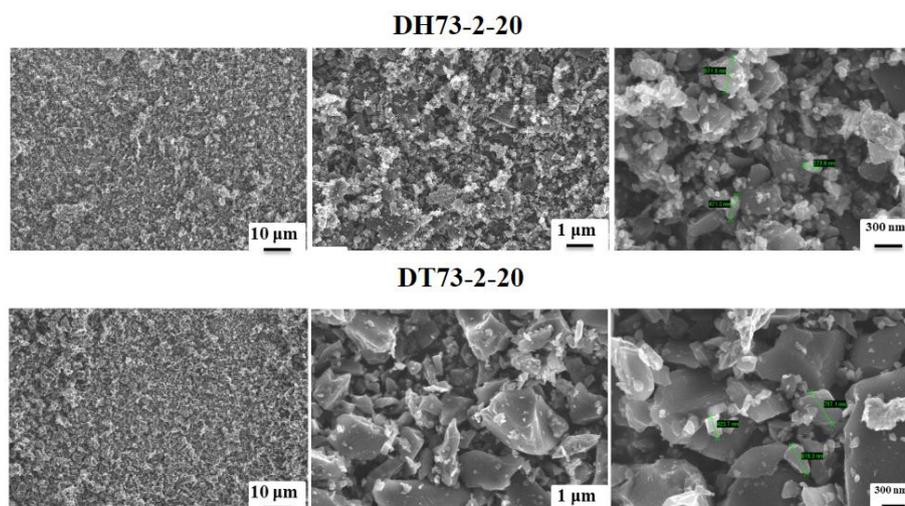


Рисунок 4. Результаты СЭМ анализа для ДН-73-2-20 и ДТ-73-2-20

Электрохимическая характеристика

Гальваностатические профили заряда-разряда.

Гальваностатические

характеристики заряд-разряда углеродных материалов, используемых в качестве анодов в ЛИА и подвергнутых циклическому воздействию при плотности тока 100 мАч/г в диапазоне напряжений от 0,01 до 3 В относительно Li/Li⁺, представлены на рисунке 5. Следует отметить, что в процессе тестирования не проводилась первоначальная активация при более низкой плотности тока.

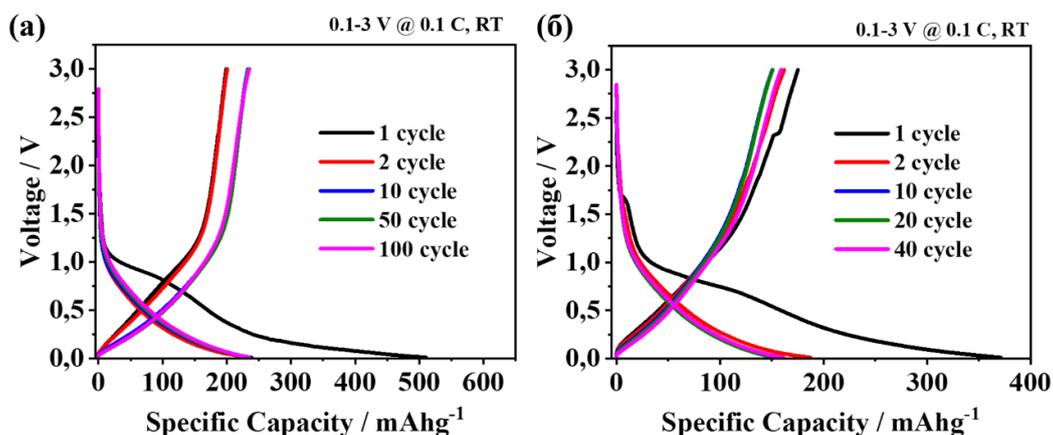


Рисунок 5. Гальваностатические профили заряд-разряда углеродных анодных материалов, полученных из ПЭТФ, для образцов (а) DH73-2-20 (1-х, 2-х, 10-х, 50-х и 100-х циклов) и (б) DT73-2-20 (1-х, 2-х, 10-х, 20-х и 40-х циклов), исследованных при плотности тока 100 мАч/г в диапазоне напряжений 0,01-3 В относительно Li/Li⁺, при комнатной температуре

Все профили соответствуют характерным кривым заряд - разряда псевдографитовых углеродных материалов, применяемых в качестве анодов в ЛИА, демонстрируя расширенное плато на начальных кривых разряда [10, 11]. Аноды DH73-2-20 и DT73-2-20 в первом цикле имеют плотность энергии разряда порядка 510 и 370 мАч/г, соответственно. При этом кулоновская эффективность в первом цикле составляет примерно 46% (DH73-2-20) и 53%(DT73-2-20). Это указывает на то, что анод DT73-2-20 демонстрирует наибольшую потерю емкости в первом цикле (около 350 мАч/г), в то время как анод DH73-2-20 показывает наименьшую потерю емкости (около 210 мАч/г). Эти значительные необратимые потери емкости в первом цикле, сопровождающиеся низкой кулоновской эффективностью, являются характерными для углеродных анодных материалов и обусловлены разложением электролита и образованием твердой электролитной межфазной пленки на поверхности анода [12]. Кроме того, разупорядоченность углеродной структуры способствует значительной потере емкости в первом цикле, поскольку ионы Li⁺ могут задерживаться в порах углеродной матрицы [13]. Эти наблюдения согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа, который показал, что ПЭТФ имеет сильно неупорядоченную углеродную структуру, что может объяснять более высокие потери емкости и низкую кулоновскую эффективность. Во втором цикле наблюдается снижение разрядной способности и потери мощности для всех анодов, сопровождаемое увеличением кулоновской эффективности. Эти тенденции сохраняются до 100-го цикла, за исключением того, что разрядная способность анодов, как правило, увеличивается, начиная со второго цикла. Это может быть связано с улучшением структурной стабильности анодных материалов после формирования твердой электролитной межфазной пленки в первом цикле. Для сравнения: углеродный анодный материал (DH73-2-20) демонстрирует лучшие электрохимические

характеристики по сравнению с аналогом (DH73-2-20), что объясняется его более высокой графитизацией и упорядоченностью. Гальваностатические характеристики заряд-разряда углеродных анодных материалов также изучались при плотности тока 100 мАч/г в диапазоне напряжений 0,01-3 В относительно Li/Li⁺ при комнатной температуре. Известно, что плотность тока зарядного цикла оказывает значительное влияние на кинетику электрохимических процессов. Как правило, при снижении плотности тока в электродные материалы может быть введено больше ионов Li⁺, что приводит к увеличению емкости и кулоновской эффективности [14, 15]. В целом анод DH73-2-20 демонстрирует наилучшие электрохимические характеристики.

Заключение

В ходе исследования были разработаны псевдографитовые твердые углероды методом пиролиза полученные из отходов ПЭТФ-бутылок.

Анодный материал DH73-2-20 обладает высокой начальной кулоновской эффективностью, удельной производительностью и стабильные циклические характеристики, что делает его перспективным для применения в ЛИА. Результаты показывают, что электрохимические параметры твердых углеродов определяются их микроструктурными свойствами, зависящими от вида растворителей. Сравнение с современными ЛИА подтверждает, что DH73-2-20 обладает потенциалом для улучшения и удовлетворяет требование крупномасштабного производства ЛИА.

Таким образом, полученный твердый углерод DH73-2-20 демонстрирует значительный потенциал в качестве анодов для ЛИА, которая открывает возможности для их дальнейшего развития и применения в энергетических устройствах.

Финансирование: данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR24992766, грант №AP23483880).

Конфликт интересов: нет конфликта интересов.

Вклад авторов: Идея и концепция исследования разработаны Е. Досымом и А. Нурпейсовой. Эксперименты выполнены А. Жанайхан и А. Сарсенгалиевой. Анализ данных провел Д. Ескожа. Текст статьи подготовлен и отредактирован всеми авторами. Руководство проектом осуществляла А. Нурпейсова.

Список литературы

1. Efimov M.N., Vasilev A.A., Muratov D.G., Kostev A.I., Kolesnikov E.A., Kiseleva S.G., Karpacheva G.P. Conversion of polyethylene terephthalate waste into high-yield porous carbon adsorbent via pyrolysis of dipotassium terephthalate // Waste Management. - 2023. - Vol. 162. - P. 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.019>.
2. Супрун Л.В., Романенко С.В., Цыганкова Т.С. Анализ и решение проблемы утилизации и вторичной переработки полиэтилентерефталат (ПЭТФ) отходов в городе Томске // Вестник науки Сибири. - 2012. - №4(5) - С. 107-112 <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/15908>
3. Чупрова Л.В., Муллина Э.Р. Технологические особенности производства упаковки из вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТ) // Молодой ученый. - 2013. - № 5 (52). - С. 123-125. — URL: <https://moluch.ru/archive/52/6954/>
4. Lotfabad E.M., Ding J., Cui K., Kohandehghan A., Kalisvaart W.P., Hazelton M., Mitlin D. High-Density Sodium and Lithium Ion Battery Anodes from Banana Peels // ACS Nano. - 2014. - Vol. 8, № 7. - P. 7115-7129. <https://doi.org/10.1021/nn502045y>.

5. Liu M., Zhang Z., Dou M., Li Z., Wang F. Nitrogen and oxygen co-doped porous carbon nanosheets as high-rate and long-lifetime anode materials for high-performance Li-ion capacitors // Carbon. - 2019. - Vol. 151. - P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.065>.
6. Zhang T., Mao J., Liu X., Xuan M., Bi K., Zhang X.L., Hu J., Fan J., Chen S., Shao G. Pinecone biomass-derived hard carbon anodes for high-performance sodium-ion batteries // RSC Advances. - 2017. - Vol. 7, № 66. - P. 41504–41511. <https://doi.org/10.1039/C7RA07231G>.
7. Wu L., Buchholz D., Vaalma C., Giffin G.A., Passerini S. Apple-Biowaste-Derived Hard Carbon as a Powerful Anode Material for Na-Ion Batteries // ChemElectroChem. - 2016. - Vol. 3, № 2. - P. 292–298. <https://doi.org/10.1002/celec.201500437>.
8. Xing B., Zeng H., Huang G., Jia J., Yuan R., Zhang C., Sun Q., Cao Y., Chen Z., Liu B. Magnesium citrate induced growth of noodle-like porous graphitic carbons from coal tar pitch for high-performance lithium-ion batteries // Electrochimica Acta. - 2021. - Vol. 376. - P. 138043. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138043>.
9. Mahalingam S., Raimi-Abraham B.T., Craig D.Q.M., Edirisinghe M. Solubility–spinnability map and model for the preparation of fibres of polyethylene (terephthalate) using gyration and pressure // Chemical Engineering Journal. - 2015. - Vol. 280. - P. 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.114>.
10. Alvin S., Yoon D., Chandra C., Cahyadi H.S., Park J.-H., Chang W., Chung K.Y., Kim J. Revealing sodium ion storage mechanism in hard carbon // Carbon. - 2019. - Vol. 145. - P. 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.112>.
11. Bobyleva Z.V., Drozhzhin O.A., Dosaev K.A., Kamiyama A., Ryazantsev S.V., Komaba S., Antipov E.V. Unveiling pseudocapacitive behavior of hard carbon anode materials for sodium-ion batteries // Electrochimica Acta. - 2020. - Vol. 354. - P. 136647. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136647>.
12. Wang L., Schnepf Z., Titirici M.M. Rice husk-derived carbon anodes for lithium ion batteries // Journal of Materials Chemistry A. - 2013. - Vol. 1, № 17. - P. 5269. <https://doi.org/10.1039/c3ta10650k>.
13. Gaddam R.R., Yang D., Narayan R., Raju K., Kumar N.A., Zhao X.S. Biomass derived carbon nanoparticle as anodes for high performance sodium and lithium ion batteries // Nano Energy. - 2016. - Vol. 26. - P. 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.047>.
14. Arrebola J.C., Caballero A., Hernán L., Morales J., Olivares-Marín M., Gómez-Serrano V. Improving the Performance of Biomass-Derived Carbons in Li-Ion Batteries by Controlling the Lithium Insertion Process // Journal of The Electrochemical Society. - 2010. - Vol. 157, № 7. - P. A791. <https://doi.org/10.1149/1.3425728>.
15. Yu H., Kim H., Wang Y., He P., Asakura D., Nakamura Y., Zhou H. High-energy ‘composite’ layered manganese-rich cathode materials via controlling Li₂MnO₃ phase activation for lithium-ion batteries // Physical Chemistry Chemical Physics. - 2012. - Vol. 14, № 18. - P. 6584. <https://doi.org/10.1039/c2cp40745k>.

Д. Есқожа¹, А. Жанайхан², А. Сәрсенғалиева³,
Л. Кусепова⁴, Г. Тажкенова⁵, А. Нурпейсова⁶

^{1,2,3,6}Аккумуляторлар Институты, Астана, Қазақстан

^{2,3,4,5}Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

⁶Астана ұлттық зертханасы, Астана, Қазақстан

Пластик бөтелкелерді литий-ионды батареяға арналған қатты көміртекке өңдеу

Аңдатпа: Пластик қалдықтың көлемінің ұлғайу мәселесі пластиктен жасалған бұйымдардың санының өсуіне, күнделікті тұрмыста, қаптау жасауда, құрылыс саласында, медицинада және басқа да көптеген салаларда үлкен сұранысқа ие болуына байланысты одан әрі өзекті болып барады. Теңіз бен құрлықты ластаушы заттың ішінде пластиктен жасалған бұйымдар айтарлықтай орын алады [1]. Зерттеу жұмыстары барысында литий-ионды аккумуляторға (ЛИА) анод материалдар өндірісі үшін ықтималдығы жоғары шикі зат ретінде құрамында көміртегі үлесі және эфирлік байланыстары жоғары болуына бірреттік қолданылған бөтелкеден алынған полиэтилентерефталларға (ПЭТФ) зерттеу жұмыстары жасалды [2].

Бұл жұмыста ПЭТФ қалдықтары екі еріткіште (дихлорметан (ДХМ) и 1,1,1,3,3,3 -гексафтор-2-пропанол (ГФИП)) синтезделіп, алынған қатты көміртектің электрохимиялық

қасиеттерін салыстыру үшін өңделді. Синтезделген көміртектер әртүрлі әдістер арқылы зерттелді, рентгендік құрылымдық талдау (РҚТ), сканирлеуші электрондық микроскопия (СЭМ), және Раман спектроскопиясы. Бұл әдістер арқылы сынаманың құрылымдық және термиялық қасиеттері туралы ақпарат алуға мүмкіндік берді.

Полиэтилентерефталаттың негізіндегі беттік қабаты модификацияланған PET-DH аноды литий сақтау үшін керемет сипаттамаға ие екенін электрохимиялық талдаулар көрсетті. Оларға жоғары меншікті сыйымдылық және жоғары зарядтау-разряд жылдамдығы жатады. Бұл көрсеткіштер оның аналогы PET-DT анодының сипаттамасынан әлдеқайда жоғары. Сонымен қатар, PET-DH аноды көп ретті заряд-разряд циклынан кейін тұрақты жоғары меншікті сыйымдылықты көрсетті, бұл оның ұзақ уақытты ЛИА үшін қолдануға тиімді екеніне дәлел.

Түйін сөздер: еріткіштер, қатты көміртек, ЛИА-ға арналған анод материал.

D. Yeskozha¹, A. Zhanaikhan², A. Sarsengaliyeva³,

L. Kusepova⁴, G. Tazhkenova⁵, A. Nurpeissova⁶

^{1,2,3,6}Institute of Batteries, Astana, Kazakhstan

^{2,3,4,5}L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

⁶National Laboratory Astana, Astana, Kazakhstan

Upcycling of plastic bottles into Hard Carbon for Li-ion batteries

Abstract: The issue of increasing plastic waste is becoming increasingly pressing due to the rise in production of plastic products for packaging, household use, and the application of polymers in the textile industry, construction, medicine, and many other fields [1]. Plastic items contribute significantly to pollution on land and at sea. This study analyzed polyethylene terephthalate (PET) derived from single-use bottles as a potential raw material for producing anode materials for lithium-ion batteries (LIBs) due to its high carbon content and numerous ester bonds [2].

In this work, PET waste was processed using two solvents (dichloromethane (DCM) and 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol (HFIP)) to produce solid carbon for comparing the electrochemical properties of the resulting carbons. The synthesized carbon was examined using various techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and Raman spectroscopy, revealing its structural and thermal properties.

Electrochemical studies indicated that PET-based anodes with a modified surface (PET-DH) exhibit exceptional lithium storage characteristics, including high specific capacity and excellent charge-discharge rates. These metrics significantly surpass those of PET-DT anodes. Moreover, PET-DH anodes show consistently high specific capacity after multiple charge-discharge cycles, indicating their potential for use in long-lasting LIBs.

Keywords: solvents, hard carbon, anode material for LIB

References

1. Efimov M.N., Vasilev A.A., Muratov D.G., Kostev A.I., Kolesnikov E.A., Kiseleva S.G., Karpacheva G.P. Conversion of polyethylene terephthalate waste into high-yield porous carbon adsorbent via pyrolysis of dipotassium terephthalate // Waste Management. - 2023. - Vol. 162. - P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.019>.
2. Suprun L.V., Romanenko S.V., Cygankova T.S. Analiz i reshenie problemy utilizacii i vtorichnoj pererabotki polijetilentereftalat (PJeTF) othodov v gorode Tomske [Analysis and solution of the problem of recycling and recycling of polyethylene terephthalate (PET) waste in the city of Tomsk] // Vestnik nauki Sibiri [BULLETIN of Science of Siberia]. 2012. №4(5). P. 107-112 <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/15908>
3. Chuprova L.V., Mullina E.R. Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva upakovki iz vtorichnogo polijetilentereftalata (PJeT) [Technological features of the production of packaging from recycled polyethylene terephthalate (PET)] // Molodoj uchenyj [Young scientist]. 2013. № 5 (52). - P. 123-125. - URL: <https://moluch.ru/archive/52/6954/>

4. Lotfabad E.M., Ding J., Cui K., Kohandehghan A., Kalisvaart W.P., Hazelton M., Mitlin D. High-Density Sodium and Lithium Ion Battery Anodes from Banana Peels // ACS Nano. - 2014. - Vol. 8, № 7. - P. 7115–7129. <https://doi.org/10.1021/nn502045y>.
5. Liu M., Zhang Z., Dou M., Li Z., Wang F. Nitrogen and oxygen co-doped porous carbon nanosheets as high-rate and long-lifetime anode materials for high-performance Li-ion capacitors // Carbon. - 2019. - Vol. 151. - P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.065>.
6. Zhang T., Mao J., Liu X., Xuan M., Bi K., Zhang X.L., Hu J., Fan J., Chen S., Shao G. Pinecone biomass-derived hard carbon anodes for high-performance sodium-ion batteries // RSC Advances. - 2017. - Vol. 7, № 66. - P. 41504–41511. <https://doi.org/10.1039/C7RA07231G>.
7. Wu L., Buchholz D., Vaalma C., Giffin G.A., Passerini S. Apple-Biowaste-Derived Hard Carbon as a Powerful Anode Material for Na-Ion Batteries // ChemElectroChem. - 2016. - Vol. 3, № 2. - P. 292–298. <https://doi.org/10.1002/celec.201500437>.
8. Xing B., Zeng H., Huang G., Jia J., Yuan R., Zhang C., Sun Q., Cao Y., Chen Z., Liu B. Magnesium citrate induced growth of noodle-like porous graphitic carbons from coal tar pitch for high-performance lithium-ion batteries // Electrochimica Acta. - 2021. - Vol. 376. - P. 138043. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138043>.
9. Mahalingam S., Raimi-Abraham B.T., Craig D.Q.M., Edirisinghe M. Solubility–spinnability map and model for the preparation of fibres of polyethylene (terephthalate) using gyration and pressure // Chemical Engineering Journal. - 2015. - Vol. 280. - P. 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.114>.
10. Alvin S., Yoon D., Chandra C., Cahyadi H.S., Park J.-H., Chang W., Chung K.Y., Kim J. Revealing sodium ion storage mechanism in hard carbon // Carbon. - 2019. - Vol. 145. - P. 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.112>.
11. Bobyleva Z.V., Drozhzhin O.A., Dosaev K.A., Kamiyama A., Ryazantsev S.V., Komaba S., Antipov E.V. Unveiling pseudocapacitive behavior of hard carbon anode materials for sodium-ion batteries // Electrochimica Acta. - 2020. - Vol. 354. - P. 136647. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136647>.
12. Wang L., Schnepf Z., Titirici M.M. Rice husk-derived carbon anodes for lithium ion batteries // Journal of Materials Chemistry A. - 2013. - Vol. 1, № 17. - P. 5269. <https://doi.org/10.1039/c3ta10650k>.
13. Gaddam R.R., Yang D., Narayan R., Raju K., Kumar N.A., Zhao X.S. Biomass derived carbon nanoparticle as anodes for high performance sodium and lithium ion batteries // Nano Energy. - 2016. - Vol. 26. - P. 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.047>.
14. Arrebola J.C., Caballero A., Hernán L., Morales J., Olivares-Marín M., Gómez-Serrano V. Improving the Performance of Biomass-Derived Carbons in Li-Ion Batteries by Controlling the Lithium Insertion Process // Journal of The Electrochemical Society. - 2010. - Vol. 157, № 7. - P. A791. <https://doi.org/10.1149/1.3425728>.
15. Yu H., Kim H., Wang Y., He P., Asakura D., Nakamura Y., Zhou H. High-energy ‘composite’ layered manganese-rich cathode materials via controlling Li₂MnO₃ phase activation for lithium-ion batteries // Physical Chemistry Chemical Physics. - 2012. - Vol. 14, № 18. - P. 6584. <https://doi.org/10.1039/c2cp40745k>

Сведения об авторах:

Ескожа Д. – автор для корреспонденции, научный сотрудник, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

ORCID 0009-0007-4799-5286

Жанайхан А. – младший научный сотрудник, Институт аккумуляторов, магистрант 1-го курса по образовательной программе «7М05307 - Химия органических веществ и нефтехимия», НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

ORCID 0009-0000-0903-0263

Сарсенгалиева А. – младший научный сотрудник, Институт аккумуляторов, магистрант 1-го курса по образовательной программе «7М05306 – Физическая химия», НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

ORCID 0009-0004-3474-3344

Кусепова Л. - кандидат химических наук, доцент кафедры химии, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

ORCID 0000-0002-6457-0999

Тажкенова Г. - кандидат химических наук, доцент кафедры химии, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, 010008, Астана, Казахстан.

ORCID 0000-0003-0491-593X

Нурпейсова А. - руководитель и ведущий научный сотрудник лаборатории систем накопления энергии, доктор в области энергетических наук и технологий, Национальная лаборатория Астана, Назарбаев Университет, ул. Кабанбай батыра, 53, 010000, Астана, Казахстан.

ORCID 0000-0002-9657-2964

Yeskozha D. - correspondence writer, researcher, Institute of Batteries, 53 Kabanbay Batyr Ave., Astana 010000, Kazakhstan.

ORCID 0009-0007-4799-5286

Zhanaikhan A. - junior researcher at the Institute of Batteries, 1st year master's student in specialty "7M05307 - Chemistry of Organic substances and Petrochemistry", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008, Astana, Kazakhstan.

ORCID 0009-0000-0903-0263

Sarsengaliyeva A. - junior researcher at the Institute of Batteries, 1st year master's student in specialty "7M05306 - Physical Chemistry", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008, Astana, Kazakhstan.

ORCID 0009-0004-3474-3344

Kusepova L. - candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of chemistry, specialty inorganic chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008, Astana, Kazakhstan.

ORCID 0000-0002-6457-0999

Tazhkenova G. - candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008, Astana, Kazakhstan.

ORCID 0000-0003-0491-593X

Nurpeissova A. - Head and Principal Investigator of the Laboratory of Energy Storage Systems, Doctor in the field of energy sciences and technologies, National Laboratory Astana, Nazarbayev University, 53 Kabanbay Batyr Ave., Astana 010000, Kazakhstan.

ORCID 0000-0002-9657-2964



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).