

РАЗРАБОТКА ГИБКИХ ЭЛЕКТРОДОВ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Т.С. Атаманова¹, М. Елеуов¹, А. Таурбеков^{1,2}, М.К. Атаманов^{1,2*}

¹Институт проблем горения, ул. Бogenбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

Аннотация

Представлены результаты получения активированных углей (АУ) термическим методом из растительного сырья различного происхождения для изготовления композитных электродов. Также предложена методика получения гибкого, ультралегкого гибридного электрода с высокой удельной емкостью на основе АУ и углеродных нанотрубок (УНТ). Полученные электроды показали высокую удельную емкость около 172 и 119 Ф/г при скорости сканирования 5 и 100 мВ/с. Материал электрода имеет более высокую удельную емкость по сравнению с электродами, изготовленными традиционными методами, за счет применения АУ отечественного происхождения с площадью поверхности 2000-3000 м²/г. Изготовленные электроды на основе АУ/УНТ показали низкое сопротивление.

Ключевые слова: электрохимия, активированный уголь, углеродные нанотрубки, пиролиз, термическое разложение.

1. Введение

Хранение энергии стало одним из основных факторов, способствующих развитию технологического прогресса, поскольку на сегодняшний день производственная и транспортная деятельность почти полностью зависима от сжигания ископаемого топлива [1]. Поиск экологически чистых, коммерчески доступных и энергоэффективных систем является целью многочисленных исследований. Батареи, топливные элементы и электрохимические конденсаторы (ЭК) являются наиболее распространенными устройствами хранения электроэнергии, каждое из которых работает по разным принципам [2]. Основной принцип батарей и топливных элементов основан на преобразовании электрической энергии в химическую энергию посредством окислительно-восстановительных реакций в материале анода и катода [3]. Электрохимические конденсаторы – это силовые устройства, ко-

торые могут быть полностью заряжены или разряжены за секунды, также известные как суперконденсаторы, ультраконденсаторы или «двухслойные конденсаторы». Накопление электрической энергии происходит с помощью адсорбции ионов или протекания быстрых окислительно-восстановительных реакций на поверхности активного материала, обладающего неограниченным сроком службы в циклах заряда/разряда [4, 5].

Активный материал используется в порошкообразной форме для создания пористой структуры с высокой удельной поверхностью, доступной для электрохимических реакций. Полимерные материалы, добавляются к активному материалу, чтобы сформировать пригодный для использования электрод. В связи с изолирующей природой полимерных материалов, для увеличения проводимости электрода добавляются различные формы проводящих углеродных материалов (УМ). Массовая доля полимерного связующего 10-20 мас.%, токо-

*Ответственный автор
E-mail: amk1310@mail.ru (М.К. Атаманов)

проводящей добавки – 5-15 мас.% от массы всего электрода. Однако даже с добавлением проводящих агентов эффективность электрода до сих пор сравнительно низкая (обычно около 1 Ом/см или меньше). Низкая проводимость электрода вынуждает использовать металл с высокой проводимостью, называемый токосъемником [6, 7]. Во время зарядки электроны быстро распределяются по всей двумерной поверхности электрода в токоприемник и им достаточно пройти через толщину электрода, чтобы достичь всего активного материала. Токосъемник также функционирует как подложка и механическая опора для материала электрода. Хотя некоторые электродные композиции могут образовывать отдельно стоящие пленку или лист. Подложка, как правило, имеет решающее значение для поддержания структурной целостности электрода на протяжении всего производства и срока службы устройства [8]. Традиционно электрод состоит из 80% активного материала по массе, в то же время другие 20 мас.% являются неактивными элементами (связующая и проводящая добавки) [9]. Следовательно, для повышения удельной энергии батарей и электрохимических конденсаторов важно не только использовать активные материалы с возможностью хранения большего количества энергии, но и минимизировать неактивный вес, необходимый для создания конечного устройства.

Углеродные материалы широко используются в качестве основного компонента электрода в устройствах накопления энергии [9]. Поскольку УМ являются основным материалом электродов, конечная производительность будет напрямую связана с их физико-химическими характеристиками. В настоящее время АУ широко используется в качестве основного материала для электродов ЭК из-за их высокой удельной емкости и разумной стоимости. АУ может быть получен из богатых углеродом органических прекурсоров путем карбонизации (термообработка при температурах от 700 до 1100 °С [11]) в инертной атмосфере с последующими процессами активации, такими как окисление в CO_2 , водяном паре или КОН, для контроля удельной поверхности и объема пор. В качестве прекурсоров можно использовать природные материалы, такие как скорлупа кокосовых орехов, древесина, смола или уголь, косточки абрикоса, рисовая шелуха [12], скорлупа грецких орехов [13] или синтетические материалы, такие как полимеры.

В [14, 15] в качестве абсорбирующего ма-

териала модельных образцов солнечных коллекторов использовались АУ, полученные из растительного сырья, такого как абрикосовые косточки, рисовая шелуха и их комбинация с УНТ. Природа сырья для получения АУ и условия активации (температура, время и газовая среда) позволяют в некоторой степени контролировать получаемую пористость и распределение пор по размерам. Химическая активация обычно требует постактивационной промывки АУ для удаления остаточных компонентов, а также любых неорганических остатков. АУ имеет большую площадь поверхности около 1000-3500 м²/г и широкое распределение пор по размерам, что способствует накоплению электрического заряда за счет адсорбции ионов на границе раздела электрод/электролит. Но зависимость между удельной емкостью и площадью поверхности электрода не является линейной [16, 17], электрическая проводимость, размер пор, тип электролита и химический состав поверхности играют решающую роль в емкости электродов. Зачастую частицы АУ обычно крепятся на металлической фольге с помощью связующих, но за последнее время опубликовано много работ по исключению связующего вещества из состава электрода без потерь прочности и эластичности [18-20].

Было исследовано влияние количества УНТ для получения гибридных электродов на основе АУ из биомасс различного происхождения. Частицы АУ в сочетании с добавками обычно используют в виде тонких пленок, покрывающих металлическую фольгу [21]. Однако эта конфигурация ограничивает удельную плотность энергии. Улучшенный контакт, который предлагают УНТ, открывает возможность разработки толстых электродов, которые более практичны, чем тонкие пленки и позволяет создавать в устройства с повышенной удельной плотностью энергии по мере уменьшения содержания металлического коллектора [22]. Добавленное количество УНТ для создания гибридного электрода также является важным параметром, так как получаемый электрод должен иметь низкую стоимость, высокую удельную емкость. Кроме того, важную роль при создании электродов играют физические характеристики, такие как гибкость, полное покрытие внешней поверхности УНТ частицами АУ.

Были исследованы сети УНТ для замены полимерного связующего при изготовлении гибридных электродов на основе АУ, полученных

из биомассы. Приготовление электродов из УНТ с АУ в гибридных электродах разработано для улучшения электропроводности обычных электродов, а также для замены обычных добавок, таких как полимерное связующее, наполнители.

2. Экспериментальная часть

В работе была проведена серия экспериментов по химической активации различных биомасс таких как абрикосовые косточки (АК), рисовая шелуха (РШ), скорлупа грецкого ореха (СГО), шелуха семечек подсолнуха (СС) и свекловичный жом (СЖ). Карбонизация проводилась в вертикальной установке для пиролиза с регулируемым электрическим нагревом в диапазоне температур от 400 до 700 °С, продолжительностью 1 час после выхода карбонизации на заданную температуру. Активацию образцов сырья проводили в стальном реакторе из нержавеющей стали объемом 0,5 дм³. В качестве активирующего агента был выбран КОН, который предварительно смешивается с уже карбонизованным АУ.

Различные биомассы были исследованы методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) на приборе RIGAKU TG 8120 (Япония), работающем в интервале температур от -180 до +725 °С (с точностью ±0,05 °С) при скорости нагрева 0,1-25 °С/мин. Скорость нагрева в эксперименте составляла 10 К/мин, исследования проводились в атмосфере азота (расход N₂ = 100 см³/мин). Образцы помещали в алюминиевые тигли с вертикальной загрузкой.

Композитные электроды были подготов-

лены при различном времени обработки ультразвуком путем смешивания частиц АУ с УНТ в весовом соотношении АУ/УНТ: 9,5/0,5; 9,7/0,3; 9/1 соответственно. В работе использовались коммерческие двустенные УНТ с высокой электропроводностью. УНТ диспергировали в этаноле с концентрацией 0,1 мг/мл. В качестве активного материала были использованы пять различных АУ, полученных из АК, РШ, СГО, СС и СЖ. Смесь АУ с УНТ диспергировали в этаноле с помощью ультразвукового аппарата банного типа мощностью 600 Вт в течение 20 мин с охлаждающим устройством, настроенным на 20 °С. Для получения электродных пленок вакуумную фильтрацию дисперсий АУ/УНТ проводили через мембранные фильтры из ПТФЭ с размером пор 5 мкм. Остаточный этанол удаляли сушкой при 90 °С в течение 2 часов. В результате были получены механически прочные пленки переплетенных УНТ, удерживающие частицы АУ. Схема процесса изготовления электродов показана на рис. 1. Большинство электродов имели толщину ~200 мкм после сушки в вакууме и ~100 мкм после прессования под давлением 10 МПа.

Для оценки электрохимических характеристик была использована титановая сетка (200*200). Ячейки с тремя электродами использовались для проведения циклической вольтамперометрии (ЦВ) с помощью потенциостата. Трехэлектродная ячейка состояла из пленки АУ/УНТ в качестве рабочего электрода, противоэлектрода из Pt-проволоки и электрода сравнения Ag/AgCl (в насыщенном водном растворе NaCl); электролит – 1 М водный раствор H₂SO₄.

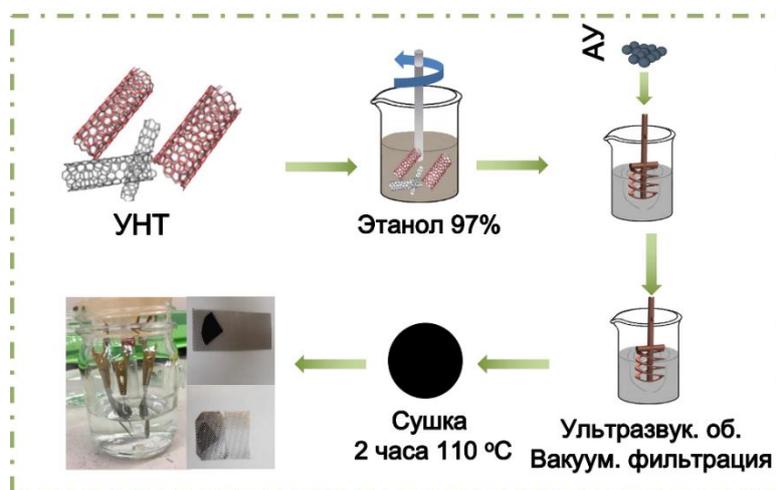


Рис. 1. Принципиальная схема приготовления электродов на основе АУ/УНТ без полимерного связующего.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2а (кривой ДСК) видно, что в каждом образце имеются пики, которые можно распознать как стадии разложения. В каждом образце имеется небольшая эндотермическая кривая, которая соответствует испарению воды, за ней следуют экзотермические сдвиги. Большинство экзотермических пиков находится в диапазоне 350–500 °С, кроме образца СЖ, где экзотермические пики наблюдаются в области 250–350 °С, что может быть связано с пиролизом пектина, глюкозы или сахарозы, которые присутствуют в составе исходного материала [23, 24], и дополнительной полосой фрагментации гемицеллюлозы посредством термической деполимеризации. Максимальная температура 345 °С соответствует самой высокой скорости разложения, характерная целлюлозе [25].

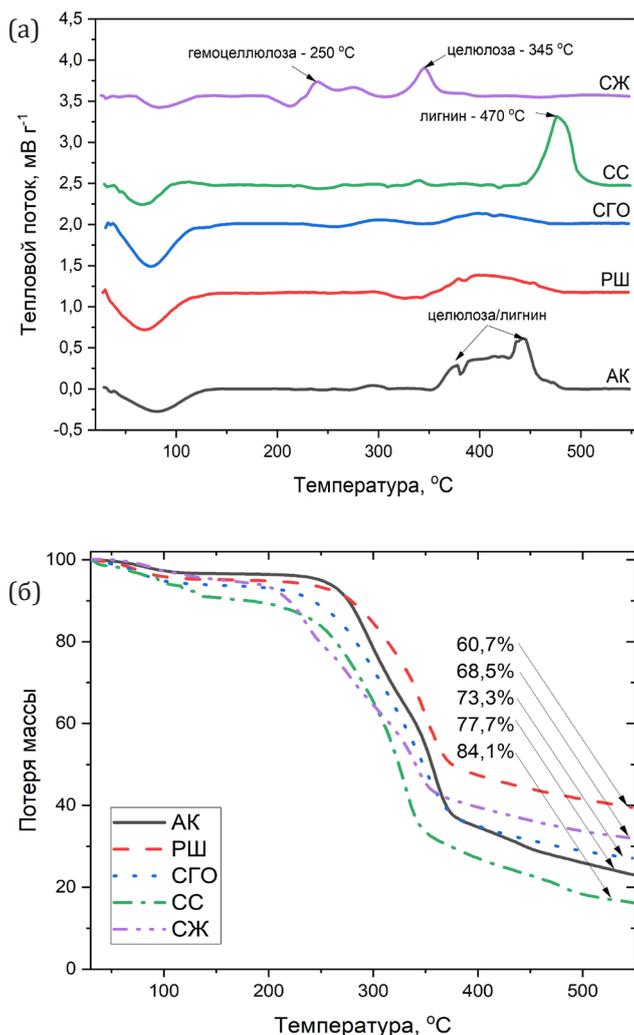


Рис. 2. ДСК и ТГ термического разложения различных биомасс при скорости нагрева 5 К/мин в потоке азота 50 мл/мин.

На кривых ТГ видно, что при повышении температуры происходит пиролиз образца с соответствующей потерей массы, которая согласуется с результатами ДСК анализа. При пиролизе всех образцов наблюдались три основных области разложения, охватывающие диапазоны температур 50–250, 250–370 и 370–600 °С. Первая область связана с испарением влаги и частичной потерей низкомолекулярных соединений, начиная от комнатной температуры до 200 °С, что согласуется с данными ДСК. Известно, что диапазон разложения пектина, сахаридов гемицеллюлозы, целлюлозы составляет 200–400 °С [26]. В области III при температуре 400–600 °С в процессе пиролиза наблюдается разложение лигнина [27]. При разложении образца СС в каждой области наблюдается наибольшая потеря массы в сравнении с другими образцами.

На рис. 3а показаны СЭМ-изображения образца электродов АУ на основе абрикосовых косточек и УНТ с увеличением до 5 мкм. Сочетание большой площади поверхности АУ с проводящими УНТ вносит увеличение массы активных материалов и приводит к достижению высокой электролитодоступности [28]. Показано равномерное распределение АУ на основе АК и покрытием с УНТ. Полученный электрод имеет развитую равномерную пористую структуру с множеством ячеек и пустот. УНТ гомогенно покрываются поверхностью частиц АУ, что облегчало создание самонесущих пленок.

Длинные гибкие УНТ обвивают частицы АУ, что было бы невозможно с другими проводящими материалами. Благодаря им электроды получили самоподдерживающуюся гибкую характеристику. На рис. 3г и д показаны СЭМ-изображения электродов АУ на основе рисовой шелухи (РШ) и УНТ с различным увеличением. Как видно из изображений, УНТ не могут покрыть поверхность некоторых частиц, это может происходить из-за условий обработки ванны ультразвуком и диаметра частиц АУ.

Для получения гибкого высокоэффективного гибридного электрода были проведены эксперименты с использованием различного весового соотношения электродов АС-УНТ 90:10, 95:5, 97:3, соответственно. Исследование электрохимических характеристик электродов, таких как удельная емкость по массе и объему, представлено на рис. 4, где при массовом соотношении 9:10 получены наиболее высокие значения.

Судя по данным на рис. 4, гравиметрическая

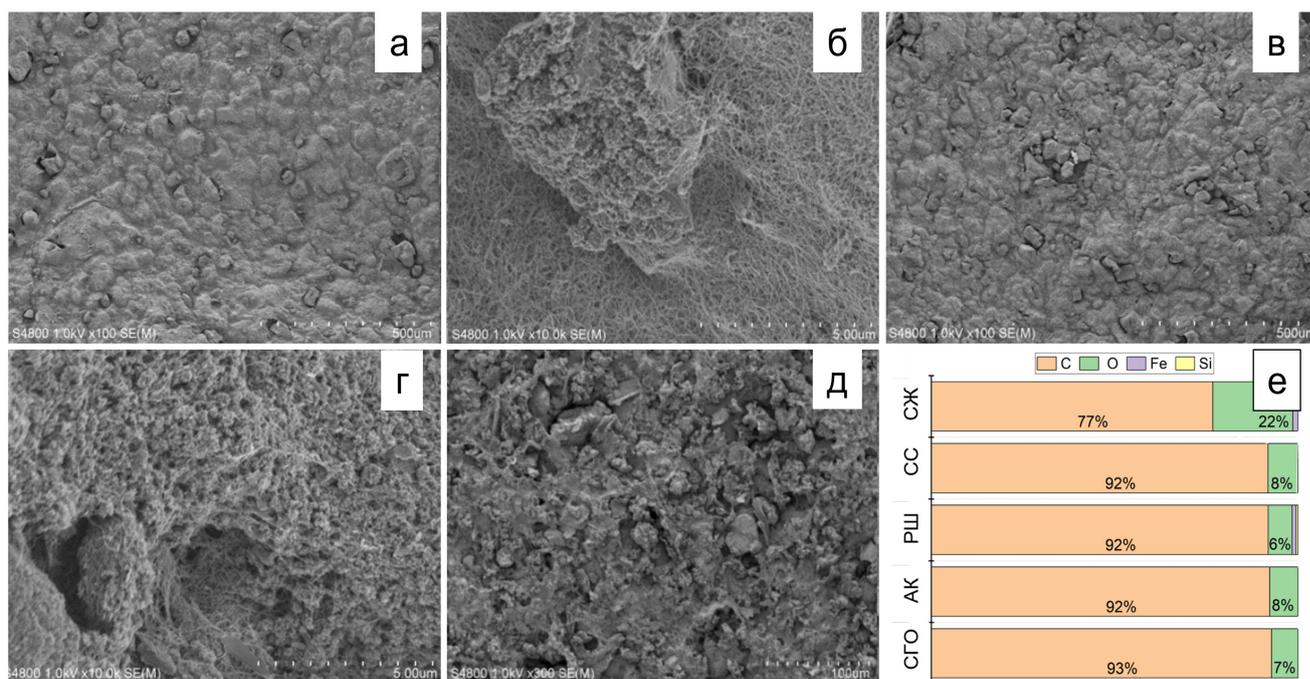


Рис. 3. СЭМ-изображения электродов: а – АУ(АК)-УНТ; б – АУ(СГО)-УНТ; в – АУ(РШ)-УНТ; г – АУ(СС)-УНТ; д – АУ(СЖ)-УНТ; и элементный анализ активированных углей (е).

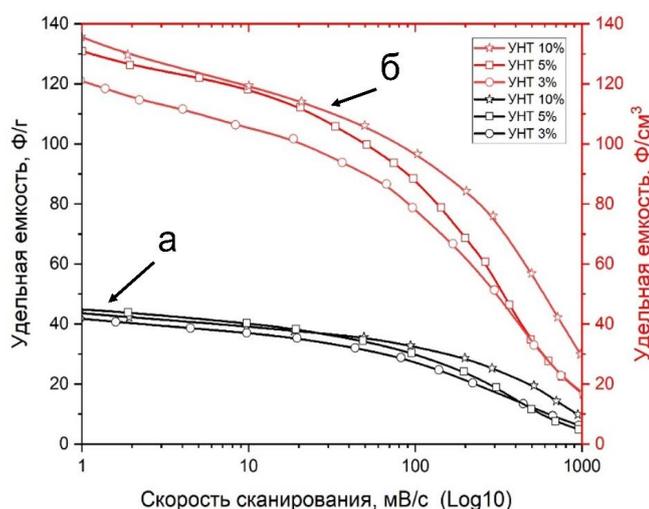


Рис. 4. Гравиметрическая (а) и объемная (б) емкости электродов АС-УНТ при различном весовом соотношении.

удельная емкость электродов была почти одинаковой во всех трех различных весовых соотношениях. Это связано с тем, что роль активного материала играют АУ, а не УНТ, и изменения веса на 3%, 5%, 10% не столь заметно повлияли на производительность. По кривой объемной емкости можно утверждать, что содержание УНТ в количестве 10% заметно увеличивает емкость полученных электродов. Загрузка УНТ в количестве 5% приводит к снижению массовой плотности по сравнению с 10% (0,33 и 0,38 г/см³), но массовая плотность гибридного

электрода с массовым соотношением АУ/УНТ 3% больше (таблица 1). С увеличением количества УНТ пленки становятся эластичными, что приводит к меньшей массовой плотности при прессовании.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что весовое соотношение АУ с ФУНТ, равное 90:10, является наиболее оптимальным для создания гибридного электрода. Использование АУ/УНТ в данном массовом соотношении эффективно сказывается на физических и электрохимических

Таблица 1. Физические свойства гибридных электродов AS1-FWCNT

Характеристики	AУ-FWCNT 90:10	AУ-FWCNT 95:5	AУ-FWCNT 97:3
Толщина (после прессования), мм	0,08	0,069	0,077
Масса, мг	4,694	4,577	4,74
Массовая плотность, г/см ³	0,33	0,38	0,35
Плотность загрузки, мг/см ²	2,67	2,60	2,69

характеристиках полученных электродов. Далее исследовалось весовое соотношение АУ:УНТ 90:10 для приготовления электродов.

Удельная емкость электродов АУ/УНТ (АУ на основе АК после обработки ультразвуком) размер показаны на рис. 5а,б. Удельная емкость электродов увеличивалась при росла продолжительности обработки ультразвуком в ванне. Увеличение емкости происходит за счет уменьшения диаметра частиц АУ, где энергия кавитации во время ультразвуковой обработки может диспергировать и разрушать твердые тела, и после ультразвуковой обработки наблюдалось общее уменьшение

размера частиц с 5–55 до 5–20 мкм. Более высокая производительность с минимальным размером частиц АУ может быть связана с низким удельным сопротивлением внутри частиц и быстрой диффузией ионов в порах угля. Влияние ультразвуковой обработки на гранулометрический состав АУ на основе АК и на значение удельной емкости демонстрирует меньшую емкость в монодисперсных фракциях, в сравнении с образцами состоящих на 80% из частиц диаметром от 5 до 55 мкм. Для применения предлагаемых электродов в реальных условиях, помимо удельной емкости, очень важны объемная емкость и поверхност-

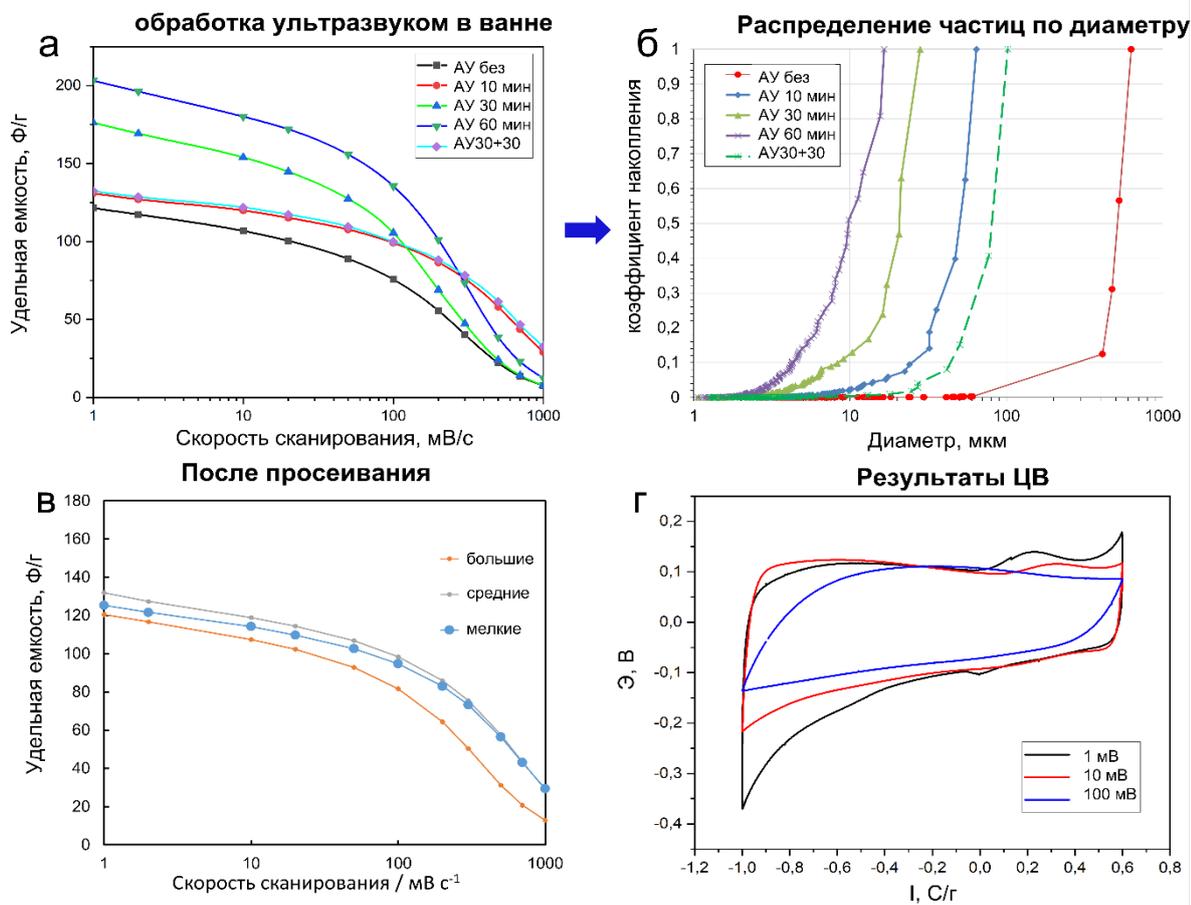


Рис. 5. Электрохимические характеристики электродов АУ/УНТ (АУ на основе АК): а – обработка ультразвуком; б – распределение по размеру; в – просеивание; г – характеристики ЦВ.

ная емкости. Также была измерена удельная емкость при различных монодисперсных размерах частиц (рис. 5в).

Циклическая вольтамперометрия (ЦВ) образца представлена на рис. 5г. Форма всех кривых ЦВ гибридных электродов имеет полупрямоугольную форму с небольшими пиками окислительно-восстановительного потенциала и незначительными широкими сигналами, присутствующими около -1 и 0,6 В. Источники окислительно-восстановительных пиков могут быть связаны с выделением и адсорбцией активированных оксидных групп на поверхности угольного электрода и последующим образованием хиноновых групп. Как видно из ЦВ-кривых, с увеличением скорости сканирования, электрод – АУ/УНТ (АУ на основе АК) постепенно деформируется от прямоугольной формы до ромбовидной, так как при более высокой скорости сканирования меньшее количество пор вносит вклад в удельную емкость, поскольку движение ионов происходит быстрее, а доступная площадь поверхности небольшая. Стоит отметить, что высокая емкость при низких скоростях сканирования характерна для пористых электродов.

4. Заключение

Из пяти полученных АУ лучшими электрохимическими показателями обладает образец на основе АК ввиду высокой удельной поверхности и развитой пористой структуры. Таким образом, из результатов измерений ЦВ видно, что гибридные электроды, полученные из АУ на основе АК, показывают высокое значение удельной емкости. Возможно, это связано с пористой структурой АУ, которая привела к образованию электропроводящей сетки с большей доступной для электролита площадью поверхности. Было исследовано влияние размера частиц АУ на электрохимические характеристики электродов. Установлено, что электроды, изготовленные с использованием АУ, содержащие широкий диапазон диаметров частиц, обладают более высокими емкостными характеристиками, чем монодисперсные образцы.

Благодарность

«Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК (грант № AP09057909)»

Литература

- [1]. Bleda-Martínez MJ, Maciá-Agulló JA, Lozano-Castelló D, Morallón E, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A (2005) Carbon 43:2677-2684. DOI:10.1016/j.carbon.2005.05.027
- [2]. Kim YT, Tadai K, Mitani T (2005) J. Mater. Chem. 15:4914-4921. DOI:10.1039/b511869g
- [3]. Hu L, Wu H, Mantia F, Yang Y, Cui Y (2010) ACS Nano 4:5843-5848. DOI: 10.1021/nn1018158
- [4]. Kaempgen M, Chan CK, Ma J, Cui Y, Gruner G (2009) Nano Lett. 9:872-1876. DOI: 10.1021/nl8038579
- [5]. Iijima S (1991) Nature 354:56-58. DOI: 10.1038/354056a0
- [6]. Beguin F, Frackowiak E (2009) Carbons for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems. CRC Press, Boca Raton, USA. P.529. ISBN 9780429141256.
- [7]. Fialkov AS (2000) Russ. J. Electrochem. 36:389-413. DOI: 10.1007/BF02756949
- [8]. Landi BJ, Cress CD, Raffaele RP (2010) Journal of Materials Research. 25:1636-1644. DOI: 10.1557/JMR.2010.0209
- [9]. Ruch P, Cericola D, Foelske-Schmitz A, Kdtz R, Wokaun A (2010) Electrochimica Acta. 55:4412-4420. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.02.064
- [10]. Prikhodko NG, Rakhimzhan NB, Smagulova GT, Lesbayev BT, Lesbayev AB, Nazhipkyzy M, Temirgaliyeva TS, Mansurov ZA (2016) Highly efficient collectors of solar energy with nanocarbon coating based on vegetable raw material. International Conference Research on Sustainable and Intelligent Manufacturing. Leiria, P.347.
- [11]. Prikhodko NG, Smagulova GT, Rakhimzhan NB, Lesbayev BT, Nazhipkyzy M, Temirgaliyeva TS, Tauasarov EK, Mansurov ZA (2017) Synthesis of Carbonaceous Materials by High-Temperature Pyrolysis of Vegetable Feedstock for Adsorbents of Solar Collectors. Digital proceedings of the 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik, Croatia. P.1580-1583.
- [12]. Prikhodko N, Rakhimzhan N, Smagulova G, Lesbayev B, Nazhipkyzy M, Temirgaliyeva T, Mansurov Z (2017) Study of Carbonized Vegetable Raw Material as Absorber for Solar Collectors. International Conference on Carbon. Melbourne, Australia P.408.
- [13]. Lozano-Castelló D, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A, Shiraishi S, Kurihara H, Oya A (2003) Carbon 41:1765-1775. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00141-6
- [14]. Pierson HO (1993) Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes, Noyes Publications. New York, USA. P.384. DOI: 10.1016/B978-0-8155-1339-1.50018-9
- [15]. Kudaibergenov KK, Ongarbayev EK, Mansurov ZA (2012) Int. J. of Biology and Chemistry 3:3-12.

- [16]. Jandosov J, Mansurov ZA, Bijsenbayev MA, Tulepov MI, Ismagilov ZR, Shikina NV, Ismagilov IZ, Andrievskaya IP (2013) Activation Advanced Materials Research 602-604:85-89. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.85
- [17]. Jandosov JM, Mansurov ZA, Bijsenbayev MA, Kerimkulova AR, Ismagilov ZR, Shikina NV, Ismagilov IZ, Andrievskaya IP (2011) Eurasian Chemico-Technological Journal 13:105-111. DOI: 10.18321/ectj74
- [18]. Rezma S, Assaker IB, Chtourou R, Hafiane A, Deleuze H (2019) Materials Research Bulletin 111:222-229. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.11.030
- [19]. Yu L, Hu L, Anasori B, Liu YT, Zhu Q, Zhang P, Gogotsi Y, Xu B (2018) ACS Energy Letters 3(7):1597-1603. DOI: 10.1021/acseenergylett.8b00718
- [20]. Vicentini R, Nunes W, Freitas BG, Da Silva LM, Soares DM, Cesar R, Rodellac CB, Zanin H (2019) Energy Storage Materials 22:311-322. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.08.007
- [21]. Simon P, Gogotsi Y (2008) Nat. Mater. 7:845. DOI: 10.1038/nmat2297
- [22]. Nagai Y, Sugime H, Noda S (2019) Chemical Engineering Science 201:319-324. DOI: 10.1016/j.ces.2019.02.038
- [23]. Meng A, Zhou H, Qin L, Zhang Y, Li Q (2013) J Anal Appl Pyrol. 104:28-37. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.09.013
- [24]. Shaoli G, Yingbo X, Zhenfeng T, Shike S, Lan H, Zhao Z, Yonghua H, Junjie W, Maoqi G, Liusi S (2015) J Therm Anal Calorim 120(2):1399-1405. DOI:10.1007/s10973-015-4440-4
- [25]. Kaushik A, Singh M (2011) Carbohyd Res. 346(1):76-85. DOI: 10.1016/j.carres.2010.10.020
- [26]. Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C (2007) Fuel 86(12-13):1781-1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013
- [27]. Mora'n JI, Alvarez VA, Cyras VP, Va'zquez A (2008) Cellulose 15(1):149-59. DOI:10.1007/s10570-007-9145-9
- [28]. Barbieri O, Hahn M, Herzog A, K'otz R (2005) Carbon 43:1303-1310. DOI:10.1016/j.carbon.2005.01.001

Development of flexible electrodes without application polymer binders based on activated carbons and carbon nanotubes

T.S. Atamanova¹, M. Eleuov¹, A. Taurbekov^{1,2}, M.K. Atamanov^{1,2*}

¹Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbay Batyr str., Almaty, Kazakhstan

²al-Farabi Kazakh National University, 71, al-Farabi av., Almaty, Kazakhstan

Abstract

The results of obtaining activated carbons (AC) by the thermal method from plant raw materials of various origins for the manufacture of composite electrodes are presented. A method for obtaining a flexible, ultra-light hybrid electrode with a high specific capacity, consisting of AC and carbon nanotubes (CNTs), is also proposed. The resulting electrodes showed high specific capacitances of about 172 and 119 F/g at scan rates of 5 and 100 mV/s. The electrode material has a higher specific capacitance compared to electrodes made by the traditional method due to the use of AC of domestic origin with a surface area of 2000-3000 m²/g. Also, the fabricated electrodes based on AC/CNT showed low resistance.

Key words: electrochemistry, activated carbon, carbon nanotubes, pyrolysis, thermal decomposition.

Белсендірілген көмірлер мен көміртекті нанотүтіктер негізіндегі полимерлі байланыстырғыштарды қолданусыз иілгіш электродтарды әзірлеу

Т.С. Атаманова¹, М. Елеуов¹, А. Таурбеков^{1,2}, М.К. Атаманов^{1,2*}

¹Жану проблемаларының институты, Бөгенбай батыр к-сі, 172, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, әл-Фараби даңғ. 71, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа

Композиттік электродтарды жасау үшін әртүрлі шығу тегі өсімдік шикізатынан термиялық әдіспен белсендірілген көмірді (БК) алу нәтижелері берілген. Айнымалы ток пен көміртекті нанотүтіктерден (CNTs) тұратын жоғары меншікті сыйымдылығы бар икемді, ультра жеңіл гибридті электродты алу әдісі де ұсынылған. Алынған электродтар 5 және 100 мВ/с сканерлеу жылдамдығында шамамен 172 және 119 Ф/г жоғары меншікті сыйымдылықты көрсетті. Электрод материалы 2000-3000 м²/г бетінің ауданы бар отандық айнымалы токты қолдану есебінен дәстүрлі әдіспен жасалған электродтармен салыстырғанда жоғары меншікті сыйымдылыққа ие. Сондай-ақ, AC/CNT негізінде жасалған электродтар төмен қарсылық көрсетті.

Кілт сөздер: электрохимия, белсендірілген көмір, көміртекті нанотүтіктер, пиролиз, термиялық ыдырау.