Е. В. Кузьмина (к.х.н., с.н.с.)¹, Л. Р. Дмитриева (инж.)¹, А.Ф. Габдуллин (магистрант)²,
Е.В. Карасева (к.х.н., с.н.с., доц.)¹, Т. Р. Просочкина (д.х.н., проф., зав. каф.)²,
В.С. Колосницын (д.х.н., проф., зав. лаб.)^{1,2}

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТОКОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЛИТИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

¹ Уфимский Институт химии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
лаборатория электрохимии

450054, г. Уфа, проспект Октября, 69; тел. (347) 2355800, e-mail: kolos@anrb.ru, kuzmina@anrb.ru

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра нефтехимии и химической технологии

450062, г. Уфа, улица Космонавтов, 1; e-mail: azamat.gabdullin.94@mail.ru

Е. V. Kuzmina¹, L. R. Dmitrieva¹, A. F. Gabdullin², E. V. Karaseva¹,
T. R. Prosochkina², V. S. Kolosnytsin^{1,2}

EFFECT OF NATURE OF POLYMER BINDER ON THE PROPERTIES OF CONDUCTIVE PROTECTIVE COATINGS FOR CURRENT COLLECTORS OF POSITIVE ELECTRODES OF LITHIUM BATTERIES

¹ Ufa Institute of Chemistry of RAS

69, Prospect Oktyabrya Str., 450054, Ufa, Russia; ph. (347) 2355800, e-mail: kolos@anrb.ru, kuzmina@anrb.ru

² Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov Str., 450054, Ufa, Russia; e-mail: azamat.gabdullin94@mail.ru

Изучено влияние природы связующего полимера углерод-полимерных покрытий для токовых коллекторов положительных электродов на их адгезию, эластичность, удельное объемное сопротивление, набухаемость в электролитах для литий-ионных и литий-серных аккумуляторов. Наиболее перспективными полимерными связующими покрытий токовых коллекторов литий-серных аккумуляторов являются акриловая смола, натуральный и хлоропреновый каучук, а для литий-ионных аккумуляторов — полиорганосилоксановая смола, полиуретан и поливинилиденфторид.

Ключевые слова: адгезия; литиевые аккумуляторы; литий-ионные аккумуляторы; литий-серные аккумуляторы; набухаемость; положительный электрод; сопротивление; токовый коллектор; токопроводящие защитные покрытия; эластичность.

Работа выполнена по теме № АААА-А17-117011910031-7 государственного задания и при финансовой поддержке РФФ №17-73-20115, РФФИ №16-29-06190.

Effect of nature of binding polymer of carbon-polymer coatings on current collectors for positive electrodes of lithium batteries on their adhesion, flexibility, specific resistance, swelling in electrolytes for lithium-ion batteries and lithium-sulfur batteries was studied. The most promising polymer binder for coatings of the current collectors for lithium-sulfur batteries are poly (acrylic acid), nature and chloroprene rubbers, and for lithium-ion batteries are polyorgano-siloxane resin, polyurethane and polyvinylidene fluoride.

Key words: adhesion; current collector; current-conducting protective coatings; flexibility; lithium batteries; lithium-ion batteries; lithium-sulfur batteries; positive electrode; resistance; swelling.

This work was performed as part of the Government Order (theme No. АААА-А17-117 011910031-7) and was also financially supported by the Russian Science Foundation (project No.17-73-20115) and Russian Foundation for Basic Research (project No.16-29-06190).

В настоящее время уделяется большое внимание разработке аккумуляторов, обладающих высокой удельной энергией, высокой мощностью, длительной циклируемостью и сохранностью.

Сохранность и длительность циклирования аккумуляторов зависит от многих факторов: стабильности активных компонентов положительных и отрицательных электродов, устойчивости электролитной системы к окислительно-восстановительной деструкции, коррозионной устойчивости конструкционных компонентов.

Для увеличения длительности циклирования и мощности литиевых аккумуляторов необходимы не только высокая производительность катодных и анодных материалов, но и высокая антикоррозионная стойкость электрода и хорошая адгезия электродного слоя к токовому коллектору^{1–5}.

Электроды изготавливают нанесением электродной массы на подготовленную фольгу (алюминиевую — токовый коллектор положительных электродов и никелевую или медную — токовый коллектор отрицательных электродов). На поверхности металлической фольги могут присутствовать соединения, ухудшающие адгезию активной электродной массы к металлической фольге. Это может приводить к отслоению электродного слоя от токового коллектора (фольги) и, как следствие, к сокращению длительности эксплуатации аккумулятора. Для улучшения адгезии электродных слоев к токовому коллектору используют токопроводящие покрытия^{6–8}. Интерес к проблемам разработки токопроводящих покрытий токовых коллекторов неуклонно увеличивается (рис. 1).

Рис. 1. Анализ публикационной активности по литиевым источникам тока: база данных <https://www.scopus.com>, ключевые слова: *lithium ion batteries (and) cathode (and/or) anode and current collector*.

Основными компонентами токопроводящих защитных покрытий является токопроводящий материал, в качестве которого наиболее часто используют различного типа углероды, и полимерное связующее. Свойства полимерного связующего определяют химическую и механическую устойчивость токопроводящих покрытий, а также адгезию покрытий к металлической фольге — токовому коллектору.

Целью данной работы является изучение влияния природы полимерного связующего на физико-химические и физические свойства токопроводящих защитных покрытий на алюминиевой фольге — токовом коллекторе положительных электродов литий-серных и литий-ионных аккумуляторов.

Материалы и методы исследования

Изученные токопроводящие защитные углерод-полимерные покрытия готовили отливкой суспензии на алюминиевую фольгу.

Углерод-полимерные токопроводящие защитные покрытия состояли на 80% мас. из токопроводящего материала и на 20% мас. из связующего.

В качестве токопроводящего материала использовали технический углерод (П-803М, ГОСТ 7885-86). Испытанные полимерные связующие представлены в табл. 1.

Углерод-полимерную суспензию готовили диспергацией углерода в растворе полимера в стеклянном герметичном реакторе при скорости перемешивания 250 об/мин в течение 24 ч. Соотношение твердой (полимер + углерод) и жидкой (растворитель) фаз составляло 1/3 по массе.

При приготовлении углерод-полимерной суспензии использовали готовый коммерческий раствор полимера, или предварительно готовили раствор растворением навески сухого полимера в соответствующем растворителе. Для приготовления раствора полимера в герметичный стеклянный реактор вносили навески растворителя и полимера и перемешивали до полного растворения последнего. Скорость перемешивания составляла 250 об/мин. Время перемешивания составляло 24–48 ч.

Суспензию углерода в растворе полимера наносили на обезжиренную алюминиевую фольгу, толщиной 16 мкм (ГОСТ 618-73) с помощью ракельного ножа (Elcometer 3580®) и настольной намазной машины. Высота ракельного ножа составляла 20 мкм. Скорость движения ракельного ножа 1 см/с.

**Полимерные связующие, использованные
при приготовлении углерод-полимерных покрытий**

Полимер	Форма использования	Сокращенное обозначение
Сэвилен, сополимер винилацетата и этилена	порошок (ТУ 6-05-1636-97)	СЭ
Натуральный каучук	раствор натурального каучука в смеси ароматических углеводородов (ТУ 2513-049-00149334-2007)	НК
Полиорганосилоксановая смола	раствор полиорганосилоксановой смолы в ксилоле (ТУ 6-02-690-76)	ПС
Акриловая смола	раствор акриловой смолы (сополимер метакриловой кислоты и бутилового эфира метакриловой кислоты) в бутилацетате (ТУ 2389-001-78983067-5)	АС
Хлоропреновый каучук	раствор хлоропренового каучука в этилацетате или смеси ароматических углеводородов (ТУ 38.1051242-84 18005)	ХК
Полиуретан	раствор полиуретанового каучука в смеси ацетона и этилацетата (ТУ 6-05-1636-97)	ПУ
Нитроцеллюлоза	раствор нитроцеллюлозы в ацетоне (ТУ 6-21-090502-2-90)	НЦ
Поливинилиденфторид	поливинилиденфторид (Solef 5130, Солвей С.А.)	ПФ
Промышленный образец	алюминиевая фольга с углеродным покрытием, производства MTI Corp	ПП

Углерод-полимерное покрытие сушили при 50 °С в течение 30 мин.

После полного удаления растворителя и охлаждения до комнатной температуры образцы алюминиевой фольги с углерод-полимерным покрытием каландрировали на электрических прецизионных вальцах (MSK-HRP-MR100A, MTI Corporation). Расстояние между валами составляло 10 мкм.

Для характеристики углерод-полимерных покрытий, нанесенных на алюминиевую фольгу, измеряли толщину и массу объектов исследования, оценивали адгезию покрытий к алюминиевой фольге, эластичность покрытий, их набухаемость в электролитных растворах, а также удельное объемное сопротивление.

Толщину слоя углерод-полимерного покрытия на алюминиевой фольге рассчитывали как разницу толщин алюминиевой фольги с покрытием и без. Толщины измеряли с помощью микрометра (модель 05101, класс точности 1).

Массу углерод-полимерного покрытия рассчитывали как разницу масс алюминиевой фольги с покрытием и без. Массы измеряли с помощью аналитических весов (AND, HR-250AG, класс точности I).

Оценку адгезии углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге проводили по методу решетчатых надрезов, описанному в ГОСТе 15140-78 ⁹.

Оценку эластичности углерод-полимерного покрытия, нанесенного на алюминиевую

фольгу, проводили по методу цилиндров, описанному в ГОСТ Р 52740-2007 ¹⁰. Испытания проводили с помощью стержней диаметром 2, 1.5 и 0.6 мм, начиная со стержня наибольшего диаметра. Образец изгибали вокруг цилиндра непокрытой стороной алюминиевой фольги к цилиндру. Покрытие в месте изгиба осматривали с помощью лупы (увеличение 10) на предмет образования трещин и/или отслаивания от поверхности. Испытания начинали со стержня наибольшего диаметра.

Набухаемость углерод-полимерного покрытия оценивали по приросту массы после выдержки образца в течение фиксированного промежутка времени (5 с, 1, 20 и 40 ч) в растворе электролита при комнатной температуре. В качестве электролита использовали 1М раствор CF₃SO₃Li в сульфолане (электролит для литий-серных аккумуляторов) и 1М раствор LiPF₆ в смеси диметилкарбоната, этилметилкарбоната, этиленкарбоната, пропилацетата и винилкарбоната (ДМК/ ЭМК/ЭК/ ПА/ВК 16/16/24/24/1) – электролит для литий-ионных аккумуляторов. Все эксперименты по оценке набухаемости выполняли в атмосфере осушенного воздуха в перчаточном боксе (содержание воды не превышало 10 ppm).

Удельное объемное сопротивление углерод-полимерного покрытия измеряли с помощью измерителя иммитанса E7-21 (Беларусь) на частоте 1 кГц. Диаметр рабочего электрода составлял 1.8 см. Удельное объемное электри-

ческое сопротивление (R_V) рассчитывали по уравнению (1).

$$R_V = \frac{(R_{\text{прибора}} - R^0) \cdot A}{l} \quad (1)$$

где R_V — удельное объемное сопротивление, Ом·м;
 $R_{\text{прибора}}$ — сопротивление образца, измеренное прибором, Ом;

R^0 — сопротивление алюминиевой фольги, измеренное прибором, Ом;

l — толщина слоя углерод-полимерного покрытия, м;

A — площадь рабочего электрода, м².

Результаты и их обсуждение

Эластичность углерод-полимерного покрытия.

Все изготовленные токопроводящие углерод-полимерные покрытия, нанесенные на алюминиевую фольгу, представляли собой темно-серую эластичную пленку. Для всех изученных составов при изгибе алюминиевой фольги с односторонним углерод-полимерным покрытием вокруг цилиндра, диаметром 0.6 мм, визуально нарушений целостности покрытий не наблюдалось.

Адгезия углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге.

Установлено, что адгезия углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге зависит от используемого связующего (табл. 2). Корреляции между полярностью полимерного связующего и адгезией углерод-полимерного покрытия не наблюдается (табл. 2).

Присутствие в молекуле полимера функциональных групп значительно улучшает адгезию углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге.

Наилучшей адгезией обладают углерод-полимерные покрытия на основе акриловой смолы и нитроцеллюлозы: при оценке адгезии методом решетчатых надрезов отслаивания пленки из углерод-полимерного покрытия вдоль линий надрезов решетки и в местах их пересечения не наблюдалось.

Наихудшей адгезией к алюминиевой фольге обладают углерод-полимерные покрытия на основе натурального каучука: при оценке адгезии методом решетчатых надрезов наблюдалось полное отслаивание пленки из углерод-полимерного покрытия вдоль линий надрезов решетки и в местах их пересечения.

Удельное сопротивление углерод-полимерного покрытия.

Удельное объемное сопротивление изученных образцов углерод-полимерных покрытий варьируется в диапазоне 5-17 Ом·м² (рис. 2). Наименьшим удельным объемным сопротивлением обладают углерод-полимерные покрытия на основе поливинилиденфторид, акриловой смолы и нитроцеллюлозы, а наибольшим удельным объемным сопротивлением — покрытия на основе натурального каучука.

Между полярностью полимера и удельным объемным сопротивлением углерод-полимерного покрытия наблюдается слабая корреляция: при увеличении диэлектрической проницаемости полимера удельное объемное сопротивление углерод-полимерного покрытия несколько снижается. Исключением являются

Таблица 2

Физико-химические свойства полимерного связующего^{11, 12} и адгезия углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге

Полимер	ε^*	$t, ^\circ\text{C}$			Адгезия углерод-полимерного покрытия ^{**}
		плавления	стеклования	разложения	
Сополимер винилацетата и этилена	2.3–2.7	52–55	-42 – -38	69–86	2
Натуральный каучук	2.5–2.6	126–156	-28 – -4	200–300	4
Полиорганосилоксановая смола	2.2–3.5	-77 – -106			2
Акриловая смола	3.1–4.5	48–50	103 – 126	250–260	1
Хлоропреновый каучук	6.3–6.6	60–70	-40	200–250	3
Полиуретан	6.5–7.1	127–203	-3 – 29	220–230	2
Нитроцеллюлоза	6–7	160		180–220	1
Поливинилиденфторид	8.9–12.2	171–180	40	185–200	2
Промышленный образец алюминиевой фольги с углерод-полимерным покрытием	-	-	-	-	1

* — диэлектрическая проницаемость полимера 25 °С при 1 кГц

** — балл по ГОСТ 15140-78.

углерод-полимерные покрытия на основе акриловой смолы и хлоропренового каучука.

Адгезия углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге оказывает более сильное влияние на удельное объемное сопротивление покрытия. Ухудшение адгезии углерод-полимерного покрытия к алюминиевой фольге приводит к существенному увеличению удельного объемного сопротивления покрытия. Это может быть вызвано ухудшением межзеренных контактов токопроводящих частиц между собой.

Каландрирование углерод-полимерных покрытий, нанесенных на алюминиевую фольгу, увеличило удельное объемное сопротивление (рис. 2). Исключением были углерод-полимерные покрытия на основе нитроцеллюлозы и поливинилиденфторида. Вероятно, при каландрировании углерод-полимерных покрытий на алюминиевой фольге происходит изолирование углеродных частиц вследствие проникновения полимера в зазоры между ними. Это приводит к уменьшению количества токопроводящих контактов.

Рис. 2. Удельное объемное сопротивление углерод-полимерных покрытий.

Набухаемость углерод-полимерного покрытия

Важным критерием возможности использования углерод-полимерных покрытий токовых коллекторов в литиевых и литий-ионных ячейках является его устойчивость к воздействию электролитной системы. Набухаемость углерод-полимерного покрытия в электролитных системах характеризует устойчивость покрытия к растворам электролита. Нами была оценена набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитных системах для литий-серных и литий-ионных аккумуляторов. Электролитный раствор для литий-серных аккумуляторов представлял собой 1М $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане, а для литий-ионных аккумуля-

торов — 1М раствор LiPF_6 в смеси диметилкарбоната, этилметилкарбоната, этиленкарбоната, пропилацетата и виниленкарбоната (ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК 16/16/24/24/1).

Установлено, что все изученные углерод-полимерные покрытия взаимодействовали с электролитными растворами: 1М раствором $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане (рис. 3а) и 1М раствором LiPF_6 в смеси органических карбонатов (рис. 3б).

Углерод-полимерное покрытие, состава 20% мас. нитроцеллюлозы и 80% мас. сажи П-803М, полностью отслоилось от алюминиевой фольги при контакте с электролитным раствором 1М $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане в течение 1 ч. Углерод-полимерные покрытия, содержащие в качестве полимерного связующего сополимер полиэтилена и винилацетата, полистирол, натуральный и хлоропреновый каучуки, акриловую смолу, полиуретан или поливинилиденфторид, набухали в электролитном растворе, но не отслаивались от алюминиевой фольги (рис. 3).

Наибольшей набухаемостью в 1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане обладают углерод-полимерные покрытия на основе полиорганосилоксановой смолы и полиуретана, а наименьшей — натурального и хлоропренового каучука. Сопоставление набухаемости углерод-полимерных покрытий в 1 М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане и функциональных групп полимерного связующего позволяет заключить, что набухаемость покрытия увеличивается с увеличением размера функциональных групп полимерных молекул.

Набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитном растворе для литий-ионных аккумуляторов (1М раствор LiPF_6 в смеси диметилкарбоната, этилметилкарбоната, этиленкарбоната, пропилацетата и виниленкарбоната (ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК 16/16/24/24/1)) значительно ниже, чем в электролите для литий-серных аккумуляторов (1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане) (рис. 3а и 3б). Следует отметить, что углерод-полимерные покрытия с нитроцеллюлозой и акриловой смолой полностью отслоились от алюминиевой фольги при контакте с электролитным раствором 1М LiPF_6 в ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК (16/16/24/24/1) в течение 5 с.

Углерод-полимерные покрытия, содержащие в качестве полимерного связующего сополимер полиэтилена и винилацетата, натуральный и хлоропреновый каучуки, полиорганосилоксановую смолу, полиуретан или поливинилиденфторид, набухали в электролитном растворе, но не отслаивались от алюминиевой фольги (рис. 3б).

Рис. 3. Набухаемость углерод-полимерного покрытия, состава 20% полимерное связующее и 80% сажи П-803М: *а* – в 1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане; *б* – в 1М растворе LiPF_6 в ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК (6). Углерод-полимерное покрытие нанесено на алюминиевую фольгу. Температура комнатная 24–25 °С. Время контакта образца с электролитом приведено в легенде.

Наибольшей набухаемостью в 1М растворе LiPF_6 в смеси ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК обладают углерод-полимерные покрытия на основе полистирола и полиуретана, а наименьшей – натурального и хлоропренового каучука. Сопоставление набухаемости углерод-полимерных покрытий в 1 М растворе LiPF_6 в смеси ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК и функциональных групп полимерного связующего позволяет заключить, что набухаемость покрытий слабо зависит от свойств функциональных групп полимерных молекул. В 1М растворе LiPF_6 в смеси органических карбонатов наименьший прирост массы наблюдается у образца на основе полиорганосилоксановой смолы, а наибольший – у промышленного покрытия.

С целью оценки влияния механической обработки (каландрирования) на набухаемость

в электролитных растворах углерод-полимерных покрытий была оценена набухаемость образцов после их каландрирования. Каландрированные образцы выдерживали в растворах электролитов в течение 40 ч (рис. 4). Установлено, что каландрирование углерод-полимерных покрытий снизило набухаемость покрытий в электролитных растворах для литий-серных и литий-ионных аккумуляторов. После каландрирования углерод-полимерных покрытий набухаемость в 1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане уменьшилась примерно на 30%, за исключением образца на основе хлоропренового каучука, набухаемость которого не изменилась.

В 1М растворе LiPF_6 в смеси органических карбонатов набухаемость углерод-полимерных покрытий после каландрирования сни-

зилась примерно на 40%, за исключением образцов на основе поливинилиденфторида и полиорганосилоксановой смолы, набухаемость которых не изменилась.

Рис. 4. Набухаемость углерод-полимерного покрытия (20% полимерное связующее и 80% сажи П-803М) после каландрирования: а – в 1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане; б – в 1М растворе LiPF_6 в смеси органических карбонатов (ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК). Углерод-полимерное покрытие нанесено на алюминиевую фольгу. Температура комнатная 24–25 °С. Время контакта 40 ч.

Таким образом, наиболее значительное влияние на адгезию к алюминиевой фольге и сопротивление углерод-полимерных покрытий оказывают наличие и свойства функциональных групп в полимерной молекуле, в то время, как изменение диэлектрической проницаемости

в диапазоне 2–12 практически не оказывает влияние на свойства покрытий. Удельное объемное сопротивление углерод-полимерных покрытий увеличивается в ряду $\text{ФК} < \text{АС} < \text{НЦ} < \text{ПУ} < \text{СВ} = \text{ПС} < \text{НК} < \text{ХК}$, а адгезия ухудшается в ряду: $\text{АС} = \text{НЦ} < \text{СВ} = \text{ФК} = \text{ПС} < \text{ПУ} < \text{ХК} < \text{НК}$.

Наличие и свойства функциональных групп полимерных молекул также оказывают значительное влияние на набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитных системах для литий-серных и литий-ионных аккумуляторов. Набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитном растворе для литий-серных аккумуляторов (1М растворе $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{Li}$ в сульфолане) увеличивается в ряду $\text{НК} < \text{ХК} < \text{СВ} < \text{АС} < \text{ФК} < \text{ПС} < \text{ПУ} < \text{НЦ}$.

Набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитном растворе для литий-ионных аккумуляторов (1М растворе LiPF_6 в смеси карбонатов ДМК/ЭМК/ЭК/ПА/ВК) увеличивается в ряду $\text{ПС} < \text{ПУ} < \text{СВ} < \text{НК} < \text{ХК} < \text{ФК} < \text{НЦ} = \text{АС}$.

Наиболее перспективными полимерными связующими для углерод-полимерных покрытий токовых коллекторов литий-серных аккумуляторов являются акриловая смола, натуральный и хлоропеновый каучук. Для литий-ионных аккумуляторов наиболее перспективными полимерными связующими являются полиорганосилоксановая смола, полиуретан и/или поливинилиденфторид.

В рамках выполнения государственного задания были разработаны методы приготовления и исследования свойств углерод-полимерных покрытий, а также изучена набухаемость углерод-полимерных покрытий в электролитных растворах литий-ионных аккумуляторов.

За счет средств гранта РНФ были выполнены исследования набухаемости углерод-полимерных покрытий в электролитных растворах литий-серных аккумуляторов и оценена адгезия и эластичность покрытий к алюминиевой фольге.

За счет средств гранта РФФИ были выполнены электрофизические исследования углерод-полимерных покрытий на алюминиевой фольге.

Литература

1. Marom R., Amalraj S. F., Leifer N., Jacob D., Aurbach D. A review of advanced and practical lithium battery materials // *J. Mater. Chem.* – 2011. – V.21. – Pp.9938-9954.

References

1. Marom R., Amalraj S. F., Leifer N., Jacob D., Aurbach D. [A review of advanced and practical lithium battery materials]. *J. Mater. Chem.*, 2011, vol.21, pp.9938-9954.

2. Ma T., Xu G.L., Li Y., Wang Li, He X., Zheng J., Liu J., Engelhard M.H., Zapol P., Curtiss L.A., Jorne J., Amine K., Chen Z. Revisiting the Corrosion of Aluminum Current Collector in Lithium-ion Batteries // *J. Phys. Chem. Lett.*— 2017.— V.8, №5.— Pp.1072-1077.
3. Chen S.K., Chiu K.F., Su S.H., Liu S.H., Hou K.H., Leu H.J., Hsiao C.C. Low contact resistance carbon thin film modified current collectors for lithium Ion batteries // *Thin Solid Films.*— 2014.— V.572.— Pp.56-60.
4. Kanga S.W., Xiea H.M., Zhang W., Zhanga J.P., Ma Z. Improve the Overall Performances of Lithium Ion Batteries by a Facile Method of Modifying the Surface of Cu Current Collector with Carbon // *Electrochimica Acta.*— 2015.— V.176.— Pp.604-609.
5. Li T., Bo H., Cao H., Lai Y., Liu Y. Carbon-coated Aluminum Foil as Current Collector for Improving the Performance of Lithium Sulfur Batteries // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2017.— V.12.— Pp.3099-3108.
6. Lee S., Oh E.S. Performance enhancement of a lithium ion battery by incorporation of a graphene/polyvinylidene fluoride conductive adhesive layer between the current collector and the active material layer // *Journal of Power Sources.*— 2013.— V.244.— Pp.721-725.
7. Инновационная вакуумная технология по созданию базовых элементов накопителей электрической энергии на основе наноматериалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vctechnologies.org>, свободный. Дата обращения: 20.03.17.
8. Корнилов Д.Ю., Губин С.П., Чупров П.Н., Рычагов А.Ю., Чеглаков А.В., Карасева А.С., Краснова Е.С., Воронов В.А., Ткачев С.В., Кашарина Л.А. Восстановленный оксид графена в качестве защитного слоя токового коллектора катода литий-ионного аккумулятора // *Электрохимия.*— 2017.— Т.53, №6.— С.701-705.
9. ГОСТ 15140-78 Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии.— М.: Стандартиформ, 1996.— 13 с.
10. ГОСТ Р 52740-2007 (ИСО 1519:2002) Материалы лакокрасочные. Метод определения прочности покрытия при изгибе вокруг цилиндрического стержня.— М.: Стандартиформ, 2007.— 19 с.
11. POLYMER DATA HANDBOOK.— Oxford University Press, Inc.— 1999.
12. David R. Lide, ed., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition (CD-ROM Version 2010), CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL. If a specific table is cited, use the format: «Physical Constants of Organic Compounds», in CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition (CD-ROM Version 2010), David R. Lide, ed., CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
2. Ma T., Xu G.L., Li Y., Wang Li, He X., Zheng J., Liu J., Engelhard M.H., Zapol P., Curtiss L.A., Jorne J., Amine K., Chen Z. [Revisiting the Corrosion of Aluminum Current Collector in Lithium-ion Batteries]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017, vol.8, no.5, pp.1072-1077.
3. Chen S.K., Chiu K.F., Su S.H., Liu S.H., Hou K.H., Leu H.J., Hsiao C.C. [Low contact resistance carbon thin film modified current collectors for lithium Ion batteries]. *Thin Solid Films*, 2014, vol.572, pp.56-60.
4. Kanga S.W., Xiea H.M., Zhang W., Zhanga J.P., Ma Z. [Improve the Overall Performances of Lithium Ion Batteries by a Facile Method of Modifying the Surface of Cu Current Collector with Carbon]. *Electrochimica Acta*, 2015, vol.176, pp.604-609.
5. Li T., Bo H., Cao H., Lai Y., Liu Y. [Carbon-coated Aluminum Foil as Current Collector for Improving the Performance of Lithium Sulfur Batteries]. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, vol.12, pp.3099-3108.
6. Lee S., Oh E.S. [Performance enhancement of a lithium ion battery by incorporation of a graphene/polyvinylidene fluoride conductive adhesive layer between the current collector and the active material layer]. *Journal of Power Sources*, 2013, vol.244, pp.721-725.
7. *Innovatsionnaya vakuumnaya tekhnologiya po sozdaniyu bazovykh elementov nakopitelei elektricheskoi energii na osnove nanomaterialov* [Innovative vacuum technology for manufacturing the basic elements of electrical energy storage devices using nanomaterials]. Available at: <http://www.vctechnologies.org>. (accessed 20.03.2017).
8. Kornilov D.Y., Gubin S.P., Chuprov P.N., Rychagov A.Y., Cheglakov A.V., Karaseva A.S., Krasnova E.S., Voronov V.A., Tkachev S.V., Kasharina L.A. [Reduced graphene oxide as a protective layer of the current collector of a lithium-ion battery]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2017, vol.53, is.6, pp. 622-626.
9. *GOST 15140-78 Materialy lakokrasochnye. Metody opredeleniya adgezii* [State Standard 15140-78. Paintwork materials. Methods for determination of adhesion]. Moscow, Standartinform Publ., 1996, 13 p.
10. *GOST R 52740-2007 (ISO 1519:2002) Materialy lakokrasochnye. Metod opredeleniya prochnosti pokrytiya pri izgibe vokrug cilindricheskogo sterzhnja* [State Standard P 52740-2007 (ISO 1519:2002) Paints materials. Method for determination of film strength while bending around cylindrical mandrel]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 19 p.
11. POLYMER DATA HANDBOOK. Oxford University Press, Inc., 1999.
12. David R. Lide, ed., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition (CD-ROM Version 2010), CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL. If a specific table is cited, use the format: «Physical Constants of Organic Compounds», in CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition (CD-ROM Version 2010), David R. Lide, ed., CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.