

---

## **ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ И МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИЕ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР С ВСТРОЕННЫМИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

В.В. Слепцов, А.О. Дителева, Д.Ю. Кукушкин, Р.А. Цырков, Д.Г. Муратов, Л.В. Кожитов, Зорин А.В.

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИЕ КАРКАСЫ, ZIF-67, ОРГАНИЧЕСКИЕ ЛИНКЕРЫ, ИОНЫ МЕТАЛЛОВ, ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ, МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ, ПИРОЛИЗ. ЭЛЕКТРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ, ГИБРИДНЫЙ КОНДЕНСАТОР, УГЛЕРОДНАЯ МАТРИЦА, ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, НАНОТЕХНОЛОГИИ.

## **ELECTRODE MATERIALS BASED ON CARBON AND ORGANOMETALLIC FRAME STRUCTURES WITH EMBEDDED CHEMICALLY ACTIVE AND FUNCTIONAL ELEMENTS**

V.V. Sleptsov, A.O. Diteleva, D.Yu. Kukushkin, R.A. Tsyrcov, D.G. Muratov, L.V. Kozhitov, A.V. Zorin

### **KEYWORDS**

ORGANOMETALLIC FRAMEWORKS, ZIF-67, ORGANIC LINKERS, METAL IONS, ELECTRODES FOR HYBRID SUPERCAPACITORS, METAL-CARBON NANOCOMPOSITES, PYROLYSIS. ELECTRODE MATERIAL, HYBRID CAPACITOR, CARBON MATRIX, THIN FILM TECHNOLOGY, NANOTECHNOLOGY.

В настоящее время максимальная удельная энергоёмкость достигнута у литиевых химических источников тока (ХИТ) и составляет 260 Вт·ч/кг, у конденсаторов – 5-10 Вт·ч/кг. Традиционная толстоплёночная технология производства ХИТ и конденсаторных структур уже в течение более 10 лет не обеспечивает необходимой динамики роста удельной энергоёмкости ХИТ и сверхъёмких конденсаторных структур, и также наблюдается тенденция существенного снижения удельной энергоёмкости с целью повышения уровня безопасности и долговременности функционирования [1-9]. При этом появляются сообщения о получении более высоких результатов по удельной энергоёмкости. Но, как правило, это связано с одновременным снижением количества циклов или безопасности эксплуатации.

Развитие аккумуляторов для достижения удельной энергоёмкости более 300 Вт·ч/кг сейчас необходимо вести в сторону развития поколения аккумуляторов с электродными материалами, представляющими из себя углеродную матрицу с высокой удельной поверхностью, в которой встраивается активный материал. В качестве электродных материалов доминирующее положение сейчас занимают углеродные материалы (графит, аморфный углерод).

Развитие аккумуляторов для достижения удельной энергоёмкости более 300 Вт·ч/кг сейчас необходимо вести в сторону развития поколения аккумуляторов с электродными материалами, которые представляют из себя углеродную матрицу с высокой удельной поверхностью, в которой встраивается активный материал. В качестве электродных

материалов доминирующее положение сейчас занимают углеродные материалы (графит, аморфный углерод, металлоорганические каркасы). Альтернативой аноду на основе графита выделяют более безопасные аноды на основе титаната лития, которые способны выдержать большое количество циклов заряда-разряда (до 7000 циклов). [10-14].

В работе представлен обзор различных видов углеродных матриц с высокой удельной поверхностью и технологии заполнения их химически активными и вспомогательными материалами. Основное внимание уделено перспективным матрицам на основе металлоорганических каркасов (МОК) и на основе серийно выпускаемых рулонных углеродных материалов типа «Бусофит». Рассмотрены их особенности структуры, представлена классификация. Рассмотрены основные методы и подходы к синтезу как самих МОК, так и композиционных материалов на их основе.

Структура МОК представляет собой регулярную трехмерную решетку, образованную органическими линкерами и металлическими кластерами. На примере анализа литературных данных по синтезу и изучению структуры показано, что характер взаимосвязей и типы металлов могут существенным образом влиять на пространственное построение и размер кристаллов МОК. МОК могут быть нано-, микро- и мезоразмерными, плотными и пористыми, объемными и слоистыми. Это все определяет их широкий спектр свойств и возможности применения.

Таким образом, в статье на примере обзора литературных источников и практическом эксперименте продемонстрировано, что разработка новых подходов к дизайну композитных материалов на основе МОК, а также исследование физико-химических закономерностей взаимодействия данных материалов с различного рода носителями является весьма актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0008.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Слепцов Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор (ORCID: 0000-0002-1171-336X), заведующий кафедрой РТН, Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, e-mail: 08fraktal@inbox.ru

Дителева Анна Олеговна – кандидат технических наук, (ORCID:0000-0002-0819-6517), Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, e-mail: anna.diteleva@mail.ru

Кукушкин Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, (ORCID: 0000-0002-6968-1495), Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, e-mail: Skyline34@nxt.ru

Цырков Роман Александрович – Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, e-mail: roma1992@yandex.ru

Муратов Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0002-4865-288X), доцент кафедры технологии материалов электроники, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, 119049, e-mail: muratov.ag@misis.ru

Кожитов Лев Васильевич – доктор технических наук, профессор (ORCID: 0000-0002-4973-1328) профессор кафедры технологии материалов электроники, Национальный

исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, 119049, e-mail: kozitov@misis.ru

Зорин Артём Викторович – аспирант, кафедра технологий материалов электроники, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, 119049, e-mail: m1602075@edu.misis.ru