

**Голові спеціалізованої вченої ради
ДФ 20 051.156
Карпатського національного
університету
імені Василя Стефаника
доктору фізико-математичних наук,
професору Івану ГАСЮКУ
(76018, м. Івано-Франківськ,
вул. Шевченка, 57)**

ВІДГУК

**офіційного опонента, доктора хімічних наук, доцента, проректора з
наукової роботи**

**Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
Халавки Юрія Богдановича**

на дисертаційну роботу Лісовської Світлани Андріївни

**«Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних
матеріалів систем накопичення заряду», подану на здобуття ступеня доктора
філософії в галузі знань 10 Природничі науки
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали**

У дисертаційній роботі Лісовської Світлани Андріївни досліджено актуальні питання прикладного матеріалознавства та електрохімії, пов'язані зі створенням ефективних електродних матеріалів для систем накопичення електричної енергії. Проведені дослідження спрямовані на вдосконалення структурно-морфологічних властивостей вуглецевих матеріалів.

Сучасний розвиток енергетики та зростання потреб у високоефективних пристроях зберігання енергії визначають особливу увагу до електрохімічних конденсаторів як до перспективних систем швидкого заряджання та розряджання. Одним із ключових чинників підвищення їх ефективності є створення електродних матеріалів із керованою пористістю та високою питомою поверхнею. У цьому контексті дисертаційна робота, що присвячена дослідженню структури, морфології та електрохімічних властивостей нанопористих вуглецевих матеріалів, є актуальною й своєчасною. Вона спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – визначення оптимальних умов синтезу та активації нанопористих вуглецевих структур для підвищення ефективності електродів електрохімічних конденсаторів.

Авторка продемонструвала високий рівень володіння методиками дослідження, побудував об'ємну та багаторівневу модель процесів, що відбуваються у подвійному електричному шарі на межі фаз активованій вуглецевий матеріал – електроліт. У роботі виконано повний

експериментальний цикл – від синтезу електродних матеріалів до дослідження їхніх характеристик із використанням імпедансної спектроскопії, вольтамперометрії, хронопотенціометрії. Такий комплекс методів дозволив встановити основні кінетичні параметри процесів та взаємозв'язки між ними.

Метою роботи є встановлення впливу технологічних параметрів синтезу та активації на структурно-морфологічні та електрохімічні характеристики нанопористих вуглецевих матеріалів, придатних для використання як електродів суперконденсаторів. Для досягнення мети дисертанткою вирішено низку завдань:

- визначено вплив температури та тривалості активації на пористу структуру, адсорбційні властивості та фрактальну розмірність;
- вивчено морфологічні й структурні зміни під час активації;
- досліджено електрохімічні властивості матеріалів у процесах заряджання/розряджання;
- встановлено оптимальні умови формування ієрархічної системи пор, що забезпечують максимальні питомі ємнісні характеристики.

Зміст та основні результати роботи

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичну значущість, а також подано інформацію про апробацію результатів і публікації.

Перший розділ містить ґрунтовний аналітичний огляд сучасного стану проблеми створення електродних матеріалів для суперконденсаторів. Автор детально розглянув принципи функціонування систем подвійного електричного шару, механізми накопичення заряду у вуглецевих електродах, а також особливості різних типів вуглецевих матеріалів.

У другому розділі подано класифікацію пористих вуглецевих матеріалів, описано методи їх синтезу та активації. Наведено фізико-хімічні принципи формування структури вуглецю в процесі термо- та хімічної активації, обґрунтовано вибір методів дослідження (адсорбційна порометрія, Раман-спектроскопія, SAXS, рентгенофлуоресценція, імпедансна спектроскопія тощо).

У третьому розділі показано результати комплексного аналізу структури матеріалів. Встановлено, що вуглецеві зразки, активовані при 400-500 °С, характеризуються високою питомою поверхнею (до 940 м²/г) і переважно мікро- та мезопористою структурою. Показано, що вплив температури та тривалості активації на розподіл пор і фрактальну розмірність поверхні визначає ефективність дифузії електроліту в об'ємі електрода.

У четвертому розділі досліджено електрохімічні властивості отриманих матеріалів. Встановлено, що оптимальні умови термоактивації забезпечують формування ієрархічної системи пор та підвищення питомої електроємності до 135-145 Ф/г. Показано, що вибір струмопровідної добавки (зокрема,

ацетиленової сажі) суттєво впливає на ефективність роботи конденсаторів, забезпечуючи високу розрядну потужність і стабільність характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Встановлено комплексну залежність між температурно-часовими параметрами активації та формуванням мікро- і мезопористої структури нанопористих вуглецевих матеріалів.
2. Визначено закономірності зміни фрактальної розмірності поверхні в процесі активації, що відображають етапи формування ієрархічної пористості.
3. Виявлено оптимальні умови синтезу, за яких забезпечується максимальна питома поверхня та висока електроємність матеріалів.
4. Встановлено вплив структурно-морфологічних характеристик на ємнісні властивості суперконденсаторів.

Практичне значення роботи

Результати дослідження можуть бути використані під час розроблення високоефективних електродних матеріалів для електрохімічних конденсаторів і літій-іонних систем накопичення енергії. Запропоновані методичні підходи до синтезу й активації нанопористого вуглецю можуть знайти застосування у промислових технологіях для виготовлення енергетичних пристроїв накопичення електричної енергії.

Зауваження до змісту тексту дисертації:

1. Не зовсім зрозумілим і не достатньо інтерпретованими є використання в якості електроліту 30 % водного розчину КОН.
2. Не показано, як поводить себе отриманий вуглецевий матеріал в органічних електролітах та йонних рідинах, які зараз широко використовуються в електрохімічних конденсаторах.
3. Аналіз ізотерм адсорбції/десорбції азоту виконано ґрунтовно, однак інтерпретація гістерезису та типу ізотерми потребує більшої аргументованості, зокрема з урахуванням співвідношення мікро- і мезопор у матеріалі.
4. Наведений за даними РФА вміст є результатом перерахунку виявлених металів на оксиди, інакше як пояснити наявність в таблиці 2.1 SO₃ який навряд чи міг утворитися за описаних умов ?
5. Обґрунтуйте природу спостереженого мінімуму питомої ємності при ~0.8 В та її повторного зростання при 1 В у водних електролітах КОН.
6. У роботі зустрічаються помилки та описки: наприклад: «електропровідності», «нейронаукці», «непруги», «Для забезпечення гнучкості»; не зовсім коректні вирази: «адсорбованого багаточастинки»; в одному випадку «іони» в іншому «йони» і таке інше.

Наведені вище зауваження не впливають на позитивну оцінку дисертаційного дослідження. Робота виконана на високому науково-методичному рівні, має завершений характер і відповідає вимогам до дисертаційних досліджень, що висуваються до здобуття наукового ступеня.

Висновок.

Дисертаційна робота «Структура, морфологія та електрохімічні властивості електродних матеріалів систем накопичення заряду» є самостійним, комплексним і завершеним науковим дослідженням, результати якого мають суттєве значення для розвитку сучасного електрохімічного матеріалознавства. Отримані наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими, достовірними й такими, що мають практичну спрямованість.

За змістом, обсягом та науковим рівнем одержаних результатів робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами) та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами). Робота заслуговує на позитивну оцінку, а її автор – на присудження відповідного наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

доктор хімічних наук, доцент,
проректор з наукової роботи
Чернівецького
національного університету
імені Юрія Федьковича

_____ Юрій ХАЛАВКА