

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

## РЕЦЕНЗІЯ

доктора фізико-математичних наук, професора,  
професора кафедри прикладної фізики і матеріалознавства  
Карпатського національного університету імені Василя Стефаника  
**Коцюбинського Володимира Олеговича**  
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

**Актуальність теми.** Електрохімічні джерела енергії, зокрема суперконденсатори, набувають усе більшого значення у сучасному світі в контексті розвитку відновлюваних енергетичних технологій, електротранспорту та портативної електроніки. Зростання потреби у високоефективних системах накопичення енергії зумовлює необхідність розробки нових електродних матеріалів із покращеними структурними, морфологічними та електрохімічними характеристиками.

Особливу увагу привертають наноструктуровані та пористі вуглецеві матеріали, які поєднують високу електропровідність, хімічну стабільність та велику питому поверхню. Їхні властивості визначаються розподілом пор за розмірами, ступенем дефектності та наявністю поверхневих функціональних груп, що безпосередньо впливає на електрохімічну поведінку та ємнісні характеристики.

Дослідження структури, морфології та електрохімічних властивостей електродних матеріалів для систем накопичення заряду є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки воно спрямоване на створення нових високоефективних енергетичних пристроїв, що відповідають сучасним вимогам енергозбереження та сталого розвитку. Вивчення взаємозв'язку між структурою, морфологією та електрохімічними властивостями таких матеріалів є важливим кроком до оптимізації параметрів суперконденсаторів і підвищення

їх енергетичної ефективності, що зумовило актуальність дисертаційного дослідження Лісовської С. А.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У поданій роботі представлено ґрунтовне дослідження в галузі електрохімічних систем накопичення енергії. Автором здійснено комплексне вивчення еволюції мікро- та мезопористої структури активованих вуглецевих матеріалів рослинного походження залежно від температури та тривалості термічної активації. Важливим науковим результатом є встановлення взаємозв'язку між фрактальною розмірністю поверхні та пористою текстурою, що дає змогу пояснити вплив структурних параметрів на адсорбційні та електрохімічні властивості матеріалів. Доведено, що регулювання умов термічної активації (температури та часу) забезпечує цілеспрямоване формування співвідношення мікро- та мезопор, сприяючи утворенню ієрархічної структури з підвищеною питомою поверхнею. Значущим результатом роботи є також виявлення впливу типу струмопровідної добавки на питомі ємнісні характеристики та внутрішній опір електродних матеріалів, що відкриває можливості для оптимізації складу електродів суперконденсаторів. Окрім того, у дисертації науково обґрунтовано взаємозв'язок між температурним режимом, тривалістю активації та питомими енергетичними характеристиками отриманих нанопористих вуглецевих матеріалів, що дозволяє цілеспрямовано підвищувати ефективність систем накопичення заряду. Представлені результати вирізняються оригінальністю, науковою обґрунтованістю та практичною значущістю, а отримані закономірності можуть бути використані для подальшої розробки вискоефективних електродних матеріалів для сучасних електрохімічних джерел енергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані у дисертаційній роботі результати мають важливе практичне значення та можуть бути використані в подальших науково-дослідних розробках, спрямованих на створення електродів нового покоління для електрохімічних конденсаторів із підвищеною питомою ємністю, стабільністю та ефективністю. Запропоновані автором підходи до керування пористою структурою та морфологією вуглецевих матеріалів дають можливість оптимізувати їхню текстуру відповідно до конкретних завдань у галузях енергетики.

Отримані результати можуть бути використані також у навчальному процесі – як дидактичний матеріал для студентів магістерського рівня вищої освіти зі спеціальності Прикладна фізика та наноматеріали. Основні положення та результати дослідження відображено у чотирьох наукових публікаціях у фахових виданнях, що індексуються у міжнародних базах Scopus, а також апробовано на п'яти міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Обсяг та зміст публікацій повністю відповідають вимогам МОН України щодо представлення результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 - Прикладна фізика та наноматеріали, і

відображають основний зміст дисертації і отримані автором наукові результати. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

В першому розділі “Загальна характеристика структури, властивостей та методів отримання електродних матеріалів систем накопичення заряду” є глибоким і змістовним оглядом сучасного стану досліджень у галузі електрохімічних конденсаторів. Автор детально розкриває теоретичні засади функціонування суперконденсаторів, моделі подвійного електричного шару, а також основні принципи вибору й удосконалення електродних матеріалів. Значною перевагою розділу є логічна структура викладу – від загальних аспектів енергетичних систем до конкретних характеристик нанопористих вуглецевих матеріалів. Особливо варто відзначити використання великої кількості актуальних літературних джерел, що свідчить про наукову обґрунтованість матеріалу. Поданий аналіз сучасних тенденцій у розробці гібридних і вуглецевих систем є цінним для подальших експериментальних досліджень. У другому розділі детально описано фізичні та хімічні процеси, що забезпечують формування пористої структури АВМ, із наведенням конкретних реакцій, прикладів сировини та умов активації, що свідчить про глибоке опрацювання теми та практичну значущість проведених досліджень. Наведено принципи та практичні аспекти застосування малокутового рентгенівського розсіювання (SAXS) для визначення параметрів пористості, рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF) – для якісного та кількісного визначення елементного складу, а також раманівської спектроскопії – для оцінки дефектності та типу зв'язків у вуглецевій структурі. Описано основні електрохімічні методи – циклічну вольтамперометрію, гальваностатичні розрядно-зарядні випробування та електрохімічну імпедансну спектроскопію, що застосовуються для дослідження ємнісних характеристик та провідності матеріалів. Третій розділ відзначається високим науковим рівнем та логічною послідовністю викладу матеріалу. Автором проведено глибокий аналіз впливу умов термохімічної активації на формування пористої структури вуглецевих матеріалів, що дозволило виявити закономірності зміни мікро- та мезопористості залежно від температури та тривалості процесу. Представлені кількісні характеристики (питома площа поверхні, об'єм пор, фрактальна розмірність, радіус гірації) свідчать про ґрунтовність експериментальних досліджень і достовірність отриманих результатів. Особливо цінним є встановлення взаємозв'язку між фрактальною розмірністю та еволюцією пористої структури, що розкриває механізми формування ієрархічної системи пор.

Четвертий розділ має високу наукову цінність і демонструє глибоке розуміння взаємозв'язку між структурними характеристиками активованих вуглецевих матеріалів та їх електрохімічними властивостями. Автором ґрунтовно проаналізовано вплив температури та часу термічної активації на ступінь

графітизації, дефектність і розвиток пористості, що дозволило визначити оптимальні умови для досягнення максимальних ємнісних показників. Важливою складовою дослідження є оцінка ролі струмопровідних добавок, серед яких ацетиленова сажа показала найкращі результати, забезпечуючи високу питому ємність і стабільність при різних режимах роботи. Отримані результати мають прикладне значення для розробки ефективних електродних матеріалів суперконденсаторів із поліпшеними енергетичними характеристиками.

**Відсутність порушення академічної доброчесності.** За результатами перевірки дисертаційної роботи та публікацій не виявлено ознак академічного плагіату, елементів фальсифікації. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

**Зауваження до змісту тексту дисертації:**

1. Авторка для дослідження трансформацій пористої структури матеріалів здійснила інтерпретацію результатів низькотемпературної адсорбційної порозиметрії азоту з використанням методу Барретта–Джойнера–Халленди (ВЖ), який ґрунтується рівнянні Кельвіна для опису перебігу капілярної конденсації. В рамках якої моделі здійснювався опис капілярної конденсації в мікропорах (зокрема для вуглецевого матеріалу серії L, сторінки 80-81 дисертації), а також чи спотсерігається кореляція між результатами використання ВЖ та NLDFT підходів для встановлення розподілу за розмірами мікропор ?
2. Як можна інтерпретувати відсутність систематичного впливу тривалості часу активації на параметри пористої структури вуглецевих матеріалів LH30-LH240 і яке пояснення можна запропонувати для спостережуваних значних відмінностей структурно-морфологічних параметрів матеріалів LH90 та LH120 порівняно з іншими вуглецевими матеріалами цієї серії (Таблиця 3.2) ? Чи спостерігається кореляція результатів визначення питомої площі поверхні матеріалів LH30-LH240 з результатами визначення фрактальних розмірностей їх поверхні, визначеними за даними методом Френкеля-Хелсі-Хілла та значеннями радіусів гірації центрів розсіювання рентгенівських променів, визначеними за методом SAXS ?
3. Відповідно до аналізу раманівських спектрів вуглецевих матеріалів LH серії отриманих за різної тривалості термообробки ріст тривалості активації від 30 хв до 120 хв (зразки LH30-LH120), веде до збільшення інтенсивності зменшення співвідношення інтегральних інтенсивностей D та G смуг що інтерпретується авторкою як «наростання графітизації» (ст. 116). Яку модель впливу тривалості активації на ступінь структурного впорядкування можна було б застосувати в цьому випадку? Як саме вибиралася лінія фону при фітінгу раманівських спектрів ? Яка похибка розрахунку латеральних розмірів кристалітів графіту за даними раманівської спектроскопії (рис. 4.5) ? Потребує додаткового пояснення вплив використання методу фітінгу спектру з

використанням багатокомпонентної моделі D-смуги (D1, D2, D3, D4 складових) на розрахункові значення латеральних розмірів кристалітів графіту.

4. Чому при розрахунку ємності для всіх електрохімічних систем композит (НВМ/струмопровідна добавка)/електроліт на основі аналізу діаграм Найквіста порівнювалися не питомі, а абсолютні значення ємності? Як саме впливала на величину ємності зміна маси електродного матеріалу? В рамках якої моделі при формуванні еквівалентних схем використовувався елемент постійної фази і що саме свідчило про «дифузійну» природу процесу, що описувався цим елементом? (Таблиця 4.1)
5. Яка з апробованих струмопровідних добавок є оптимальною з точки зору досягнення максимальних значень питомої енергії конденсаторних систем на основі пористих вуглецевих матеріалів?
6. В ряді випадків автором вживаються терміни, які не можна вважати широко вживаними, зокрема «адсорбційний багатошар», «шаблонні вуглеці». Крім того, у роботі присутні орфографічні помилки, наприклад у слові «посилань» (стор. 20), «зазбезпечують» (стор. 28), «ймовірнро» (стор. 123).

Наведені зауваження жодним чином не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи. Вони не впливають на достовірність отриманих результатів, наукову новизну та обґрунтованість висновків, а також не применшують наукову й практичну значущість проведеного дослідження. У роботі представлено нові, експериментально підтвержені дані, що мають вагомe значення для створення більш ефективних і стабільних матеріалів, придатних для застосування в системах накопичення та зберігання електричної енергії. Вважаю, що дисертаційна робота за своєю актуальністю, масштабом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю результатів є самостійним, оригінальним авторським дослідженням, яке повністю відповідає вимогам МОН України: «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 та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), які пред'являються до дисертацій, а її автор Лісовська С.А., заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Рецензент:

завідувач кафедри прикладної фізики і матеріалознавства

Карпатського національного університету імені Василя Стефаника

доктор фізико-математичних наук,

професор

\_\_\_\_\_ Володимир КОЦЮБІНСЬКИЙ