

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Якимчука Миколи Миколайовича

на тему «Вплив наноструктурованого вуглецю на електронні властивості композитів на основі гідрогенізованого титану», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

Насьогодні гостро стоять питання енергонезалежності України та зменшення шкідливого впливу енергетики на довкілля. Так, на даний час досить значна частина електроенергії виробляється завдяки згоранню викопних видів палива, що є причиною цілого комплексу як ризиків для економіки та безпеки, так і шкідливих впливів на навколишнє середовище та клімат. Тому **актуальним і важливим** є перехід до альтернативних способів генерації енергії з використанням безпечних, доступних та відновлюваних джерел. Один з перспективних напрямів розвитку сучасної енергетики пов'язаний з прямим перетворенням енергії. Розвиток даного напрямку потребує розробки нових матеріалів зі спеціальними властивостями, які забезпечать широке впровадження відповідних способів виробництва енергії, достатньо високий ККД перетворювачів та застосування екологічно чистих матеріалів. Даній проблематиці присвячена дисертаційна робота Якимчука М.М.

Представлена дисертація виконувалась у відділі електронної структури та електронних властивостей Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України та цілком відповідає напрямку наукових досліджень даної установи та підрозділу. Так, вона виконувалася в рамках наступних наукових тем: «Інженерія структурно-фазового стану і властивостей матеріалів, як основи сучасних технологій» (2016–2018 рр.), номер держреєстрації 0116U002421; «Квантова природа механізмів утворення та діагностика властивостей наномасштабних структур і пристроїв на їх основі» (2018–2019 рр.), номер держреєстрації 0118U007087; «Електронна будова метал-вуглецевих наноструктур і оптимізація їх електронних властивостей для використання в перетворювачах сонячної енергії» (2018–2022 рр.), номер держреєстрації 0118U000416; «Нові напівпровідникові 1D- і 2D-структури на основі ВНТ та оксидів перехідних металів для використання в ефективних

термофотоперетворювачах енергії та сенсорах» (2018–2020 рр.), номер держреєстрації 0118U006408; «Квантова динаміка квазічастинкових збуджень в гібридних металевих наноструктурах» (2020–2021 рр.), номер держреєстрації 0120U000132; «Функціоналізація метало- та вуглецевмісних композитів для альтернативної енергетики» (2021-2022 рр.), номер держреєстрації 0121U110288. Виконання дисертації в межах вказаних наукових тем є додатковим аргументом на користь того, що представлені у роботі результати пошуку та дослідження нових композитних матеріалів, які мають застосування як катоди для фототермoeмісійних перетворювачів (ФТЕП) та можуть сприяти зменшенню їх робочих температур і, в цілому, поширенню даного способу прямого перетворення променистої та теплової енергії на електричну, становлять інтерес щодо розвитку фундаментальних і прикладних досліджень у розробці нових матеріалів для енергетичної галузі.

Обґрунтованість наукових результатів дисертації та їх **достовірність** зумовлені використанням сучасних експериментальних методів та теоретичних підходів до дослідження композитних систем метал-вуглецеві наноструктури (ВНС), а також узгодженістю висновків роботи з загальними фізичними принципами та дослідженнями інших авторів, відомими з наукової літератури.

В роботі отримано низку **нових** наукових результатів.

1. Розроблено методику синтезу порошкових композитних матеріалів на основі наводненого титану з додаванням вуглецевих наноструктур, а саме, вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та терморозширеного графіту (ТРГ). Встановлено зв'язок між структурою, електрофізичними та емісійними властивостями отриманих композитів, зокрема, виявлено важливу роль переносу вільних носіїв заряду між різними складовими композиту, що призводить, наприклад, до зменшення роботи виходу при його утворенні порівняно з чистими компонентами.
2. Встановлено роль водню, який міститься в гідрогенізованому титані, у формуванні та роботі катодів ФТЕП за підвищених температур, зокрема, у процесах відновлення оксидних оболонок металевих частинок за його дифузії з їх об'єму до поверхні під час процесу дегідрування титану.
3. На основі композиту $\text{Ti} + 0,53 \text{ мас. \% ТРГ}$ було сформовано катоди ФТЕП та встановлено, що для них є характерною структурна перебудова поверхні з утворенням нових вуглецевих наноструктур на металевих частинках під час випробувань на сонячному концентраторі енергії. Для

модифікованих таким чином катодів початок емісії електронів починався за температур 170–350°C, що у 3–5 разів нижчі за робочі температури традиційних термоемісійних перетворювачів з тугоплавких металів.

Експериментальні дослідження проводились на достатньо високому рівні з використанням низки сучасних методів та обладнання, а для пояснення електрофізичних властивостей композитів використано адекватну теоретичну модель гетерогенної матричної системи. Здобувач вміло застосовує набуті знання, практичні навички й компетентності, а одержані ним результати в повній мірі відповідають поставленим в дисертаційній роботі завданням та задачам.

Представлені в дисертації результати є важливими як з наукової, так і з **практичної** точки зору. Так, розроблено метод одержання за допомогою концентрованого сонячного світла катодів на основі композиту гідрогенізований титан–терморозширений графіт. Результати дослідження вказують на можливість використання таких систем в якості «холодних» катодів фототермоемісійних перетворювачів енергії, що сприятиме розповсюдженню даного типу прямого перетворення на електрику променистої та теплової енергії.

Наукові результати дисертаційної роботи **повною мірою висвітлено** у 18 наукових працях, в тому числі у 8 статтях у періодичних наукових виданнях, з яких 4 статті опубліковано у виданні, що індексується у базі даних Scopus та відноситься до третього квартилю (Q3) згідно класифікації SCImago Journal and Country Rank. Крім того, серед наукових праць здобувача 1 препринт, 1 стаття у колективній монографії та 2 статті у закордонних наукових виданнях. Результати роботи також було представлено на 10 наукових конференціях різного рівня, у тому числі міжнародних.

Оцінюючи зміст дисертації, її **завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**, слід відзначити наступне. За змістом дисертаційна робота Якимчука М.М. відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Дисертація є завершеною науковою працею, в якій висвітлено основні результати дослідження структури та електронних властивостей нанокompозитних матеріалів на основі гідрогенізованого титану та ВНС, а також принципи та перспективи створення «холодних» катодів ФТЕП, що сприятиме більш широкому розповсюдженню даного виду перетворювачів енергії та відкриє нові можливості для подальшого розвитку альтернативної енергетики. Дисертаційна робота Якимчука М.М. є оригінальною роботою без елементів плагіату, що

відображено у відповідному звіті перевірки рукопису на академічний плагіат, а використані в роботі необхідні запозичення мають належні посилання на першоджерело.

Дисертація написана українською мовою. Стиль написання лаконічний та логічний. Застосована в роботі термінологія є загальноприйнятою та загальновживаною. Оформлення дисертації в цілому виконано у відповідності до вимог наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», структура роботи зручна для сприйняття. Розділи сформовано відповідно до поставленої мети та завдання дослідження.

Матеріали дисертаційного дослідження викладено на 127 сторінках, з використанням 138 літературних джерел, розміщених на 14 сторінках. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку літературних посилань.

У вступі висвітлено актуальність, мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячено аналізу будови та ролі композитних матеріалів на основі металів і вуглецевих наноструктур та можливостей їх використання в сонячній енергетиці. Проведений аналіз показав необхідність створення нових композитних матеріалів, які мають непритаманні вихідним компонентам властивості.

У другому розділі описано матеріали, які використовувалися в ході виконання дисертаційної роботи та методи їх дослідження.

Третій розділ присвячено дослідженню вихідних компонентів, які використовувалися при створенні композитів. Представлено результати дослідження композитів на основі гідрогенізованого титану з додаванням різного типу вуглецевих наноструктур (ВНТ, ТРГ). Дослідження показало, за яких умов спостерігається утворення композитів та як впливає наявність водню в титані на їх властивості.

У четвертому розділі наведено результати досліджень зміни структури та електрофізичних властивостей отриманих композитів під дією зовнішніх чинників – температури та тиску. Показано, що попередня механічна обробка (механосинтез) порошкових зразків з ТРГ найсуттєвіше змінює структурний стан саме вуглецевої складової композиту, яка стає більш однорідною та менш пухкою порівняно з чистим ТРГ. Такий композит можна описати моделлю гетерогенної матричної системи. Його тривалий відпал у вакуумній печі супроводжується необоротними змінами структури та електронних

властивостей матеріалу, у той час як короткотривале нагрівання не порушує термічної стабільності електрофізичних властивостей композиту.

П'ятий розділ присвячено дослідженню можливості використання одержаних композитів як матеріалів для «холодних» катодів ФТЕП. Показано, що для катода з композиту гідрогенізований $Ti + 0,53 \text{ мас. \% ТРГ}$ струм емісії спостерігався за температур менше 200°C без прикладання зовнішньої напруги.

Дискусійні положення та зауваження щодо оформлення та змісту дисертації

1. У роботі розглянуто можливості створення нанокомпозитів на основі гідрогенізованого титану з вуглецевими наноструктурами та показано суттєву роль водню в них, але не було проведено дослідження зміни його впливу в залежності від концентрації в металевій матриці.

2. В дисертації наводяться результати досліджень, в яких змінювався тип вуглецевої складової (ВНТ, ТРГ). Бажано було б доповнити дослідження зі зміною типу металу.

3. Дослідження на сонячному концентраторі було виконано для зразка складу $Ti + 0,53 \text{ мас. \% ТРГ}$, який показав найбільший ефект зміни електрофізичних властивостей при утворенні композиту. Варто було б аналогічним чином дослідити й композити з іншим вмістом ТРГ, а також композити з різним вмістом ВНТ.

4. Дві з чотирьох статей здобувача (у журналі з квантилем Q3) опубліковано в одному випуску журналу, а тому мають бути зараховані як одна робота. Проте, загальна кількість статей та їх науковий рівень задовольняють усім вимогам, які висуваються до публікацій здобувача ступеня доктора філософії.

5. У тексті дисертації наявна невелика кількість орфографічних та стилістичних помилок

Вищенаведені зауваження не знижують загальне позитивне враження від роботи та не мають відношення до її новизни, наукового та практичного значення.

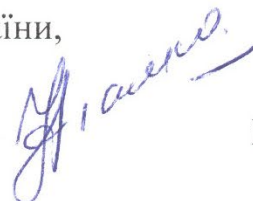
Отже, дисертаційна робота Якимчука Миколи Миколайовича на тему «Вплив наноструктурованого вуглецю на електронні властивості композитів на основі гідрогенізованого титану» виконана на високому науковому рівні, є закінченою науковою працею, результати якої відкривають нові можливості у

створенні та використанні метал-вуглецевих нанокompозитів в енергетичній галузі.

Вважаю, що дисертація «Вплив наноструктурованого вуглецю на електронні властивості композитів на основі гідрогенізованого титану» в цілому відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та вимогам пп. 6–9 «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 № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Якимчук Микола Миколайович, заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент

завідувач відділу теплофізики
енергоєфективних теплотехнологій
Інституту технічної теплофізики НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор



Наталія ФІАЛКО

