

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, професорці
ЯРЕМЧУК Ірині Ярославівні

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора фізико-математичних наук, професора

Луцьова Сергія Валентиновича

на дисертацію **ЖИДЕНКА Іллі Володимировича** на тему:

**«Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною
ефективністю для сенсорної електроніки»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 171 «Електроніка»
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми дисертації. Посилення вимог до пожежної безпеки полімерних матеріалів вимагає розробки таких матеріалів з покращеними вогнетривкими властивостями. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є створення гібридних нанокompозитів із додаванням нанопоповнювача. Дослідження підвищеної здатності до розсіювання тепла та покращеної вогнестійкості полімерних матеріалів за рахунок додавання вуглецевих нанотрубок є важливою дослідницькою задачею.

Оптимізація процесів синтезу та компонент технологічного процесу, таких як час диспергування нанотрубок, відкриває нові можливості для створення матеріалів з покращеними характеристиками для сенсорної електроніки та інших високотехнологічних застосувань. Розробка автоматизованих установок та методик для вимірювання електричних характеристик та термічного відгуку полімерних нанокompозитів є важливим кроком у напрямку підвищення точності та відтворюваності результатів досліджень, що має значну наукову релевантність.

Вирішення у дисертації Жиденка І.В. низки перелічених проблем, які, в першу чергу, стосуються підвищення безпеки та розширення функціональних можливостей нанокompозитних систем, визначає актуальність теми

дисертаційної роботи. Актуальність роботи також безпосередньо пов'язана з науково-дослідними роботами Міністерства освіти і науки України для молодих учених «Функціональні наноматеріали для адаптивного роботизованого інформаційно-вимірювального комплексу оборонного спрямування» (№ державної реєстрації 0119U100435, 2019-2021 рр.) та «Оптимізовані нанокомпозити та сенсорні структури для оборонних систем контролю безпеки та виявлення загроз» (№ державної реєстрації 0116U004411, 2022-2024 рр.), в яких здобувач був виконавцем.

Для вирішення завдань, поставлених у роботі, використано сучасні методи дослідження, такі як сканувальна електронна мікроскопія (для дослідження морфології та структури нанокомпозитів), імпедансна спектроскопія (для дослідження електричних властивостей), а також методи вимірювання електропровідності при різних температурах. Проведено комп'ютерні симуляції електропровідності у композитних системах нанотрубки/діелектрик з використанням алгоритмів моделювання перколяційних процесів та оптимізації параметрів. Термічний профіль нанокомпозитних зразків вимірювався шляхом поступового їх нагрівання і охолодження у контрольованих умовах. Тому напрямок дисертаційного дослідження, пов'язаного із вивченням процесів, що відбуваються у нанокомпозитах під впливом різноманітних чинників, є актуальною науково-прикладною задачею.

Найважливіші наукові результати дисертації та їх новизна.

Найважливіші наукові результати та новизна дисертації полягає у комплексному вирішенні науково-прикладної задачі дослідження нанокомпозитів з різним вмістом нанотрубок та підвищеною вогнезахисною ефективністю, які зможуть використовуватись в ролі захисних покриттів та чутливих елементів для сенсорної електроніки. Зокрема, було встановлено, що

- одночасний вплив β -випромінювання з середньою енергією 0,17 MeV та γ -випромінювання з енергією 0,19 MeV збільшує електричний опір нанокомпозитів на 2 кОм, а утворенні радіаційні дефекти внаслідок поглинання дози випромінювання призводять до появи центрів захоплення, іонізація яких змінює електропровідність нанокомпозитів в температурному інтервалі 230–260 K;

- ступінь диспергування нанотрубок у полімерній матриці відіграє значну роль у регулюванні вогнезахисної ефективності нанокompозитів. Показано, що для теплового профілю зразків з часом диспергування нанотрубок 2 год характерною є різниця температур у 55 °С, тоді як для зразків з часом диспергування нанотрубок 1 год така різниця не перевищує 50 °С;
- при відстані тунелювання у межах 1,5...3 нм провідність нанокompозиту досягає 50 См/м при об'ємній концентрації нанотрубок 2%, а збільшення до 120 відношення довжини нанотрубок з концентрацією 0,05% до їх діаметра дозволяє досягнути провідності 90 См/м;
- оптимальний концентраційний діапазон для покращеної термічної стабільності та теплопровідності становить 1,5-2,5%, а заміна одностінкових вуглецевих нанотрубок на багатостінкові покращує вогнетривкість кінцевого нанокompозиту на 25%.

Практичне значення та практична цінність одержаних результатів.

Одержані результати містять відомості про особливості структурної інженерії та способи покращення вогнестійкості нанокompозитів, що можна використовувати для розроблення на їх основі нових матеріалів з підвищеною вогнезахисною ефективністю. Нанокompозити з керованою електропровідністю та чутливістю до зовнішніх фізичних полів відкривають можливості для створення сенсорних систем нового покоління, здатних до самодіагностики свого стану та адаптації до змін у навколишньому середовищі. Розроблені моделі для комп'ютерного моделювання електропровідності та перколяційних процесів у нанокompозитах зменшують час, необхідний для прогнозування їх властивостей, прискорюючи цим можливість їхнього впровадження у виробництво. Методика аналізу температурних профілів може бути корисною для інженерів, які займаються розробкою нових багатофункціональних матеріалів для протипожежного захисту.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Можна відмітити, що дисертація представляє собою завершену наукову працю, яка складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (з 128 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 192 сторінки, з яких 169 сторінок основного тексту, та містить 90 рисунків і 2 таблиці.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету досліджень та пов'язані з нею предмет та об'єкт дослідження. Відповідно

до визначеної мети визначені основні завдання дослідження та напрямки їх розв'язання, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, наведено дані щодо особистого внеску здобувача та апробації результатів роботи, а також відомості про структуру дисертації.

У першому розділі наведено огляд літератури щодо технологій одержання нанокомпозитів та методологій їх синтезу. Показано, що додавання нанорозмірних елементів наповнення, таких як наночастинки та нанотрубки, до діелектричної матриці значно покращує фізичні властивості матеріалів. Інтенсивний розвиток у сфері створення нових електропровідних полімерних композитів з використанням вуглецевих наповнювачів (нанотрубки, ультрадисперсні форми графіту, вуглецеві волокна та нитки) обумовлений широкими можливостями застосування цих матеріалів у сенсорній електроніці та захисних покриттях. Відзначено, що незважаючи на значний обсяг досліджень у цій області, проблема вогнетривкості цих матеріалів залишається недостатньо вивченою і потребує додаткових досліджень.

У другому розділі розглянуто особливості одержання нанокомпозитів, що містять одно- та багатостінкові нанотрубки, описані експериментальні методики їх вивчення та теоретичні моделі для комп'ютерних симуляцій. Розділ включає детальний опис методології та програмно-апаратного забезпечення, необхідних для опису явищ переносу в нанокомпозитах. Зокрема, проаналізовано специфіку проведення експериментів за допомогою імпедансної спектроскопії, включаючи підходи до обробки одержаних спектрів імпедансу за допомогою різних алгоритмів, процедуру відбору та аналізу результатів, а також методи моделювання експериментальних спектрів за допомогою еквівалентних схем. Розглядаються різні підходи до вимірювання теплопровідності та термічної стабільності нанокомпозитів, а також вплив додавання нанотрубок на ці властивості. Проаналізовано, як змінюються термічні характеристики матеріалів при додаванні різних концентрацій нанотрубок, і які механізми впливають на покращення термічної стабільності та теплопровідності.

У третьому розділі представлено результати теоретичних досліджень нанокомпозитів, створених шляхом додавання нанотрубок у діелектричну матрицю. Запропоновано систему чисельного моделювання, яка дозволяє параметризувати властивості нанотрубок у діелектричному середовищі та

візуалізувати результати за допомогою різних формалізмів опису електропровідності. Дана модель враховує ефект тунельної провідності, що значно впливає на електричні взаємодії між нанорозмірними об'єктами. Комп'ютерні експерименти показали, що ймовірність формування провідності нанокомпозиту залежить від орієнтації нанотрубок. Для високих концентрацій орієнтованих нанотрубок максимальний поріг перколяції спостерігається для елементів довжиною 2-3 мкм. Симуляції також продемонстрували можливість контролю над орієнтацією нанотрубок у гібридних композитах за допомогою зовнішніх полів.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень властивостей нанокомпозитів. Проведено всебічне дослідження змін електричного опору нанокомпозитних структур в залежності від температури, частоти прикладеної змінної напруги та дози поглинутого бета- та гамма-випромінювання. Виявлено, що додавання нанотрубок до полімеру підвищує електропровідність та покращує чутливість до радіаційного впливу. Досліджені термічні властивості нанокомпозитів, які визначають їх вогнестійкість. Встановлено, що ступінь диспергування нанотрубок у полімерній матриці відіграє важливу роль у регулюванні вогнезахисної ефективності нанокомпозитів. Зразки з часом диспергування нанотрубок 2 години демонструють пікову різницю температур у 55 °С, тоді як зразки з часом диспергування 1 година мають різницю не більше 50 °С.

Повнота викладення результатів дисертації в наукових виданнях. Основні результати досліджень опубліковано у 25 наукових публікаціях, серед них 6 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, з них 3 статті у періодичних реферованих журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз Web of Science і Scopus та 19 публікацій у матеріалах та збірниках доповідей наукових конференцій, з яких 5 індексуються у наукометричній базі Scopus.

Анотація повно та чітко відображає основні положення, результати та висновки дисертації, ступінь новизни та практичне значення результатів досліджень, їх сутність та особистий внесок здобувача.

Відсутність порушень академічної доброчесності підтверджує наявна довідка про результати перевірки на академічний плагіат дисертації Жиденка І.В.

Серед недоліків дисертації можна зазначити такі:

- Представляючи аналіз розподілу температур у зразку на основі даних, отриманих з інфрачервоної камери, автор обмежується порівнянням лише двох стадій нагріву. Цікаво та інформативно було б одержати більш детальну картину динаміки теплових процесів, оскільки, вочевидь, апаратні можливості та відповідна конфігурація експерименту автором уже забезпечена.
- У експерименті з опроміненням зразка не згадується про можливий вплив низькоенергетичної радіації на контакти, що використовуються для вимірювання електропровідності в описаній геометрії. Якщо таким впливом можна знехтувати, то це варто було б зазначити в роботі.
- У розділі 2.4.2, зокрема, в обговоренні рисунку 2.12, доцільно було б надати характеристики цифрових та аналогових сигналів, що відіграють суттєве значення в реалізованому експерименті.
- Величини, які входять у формули 2.1 та 2.2 на сторінці 74, варто було б вказати (наприклад, потрібно зазначити, що Ω позначає циклічну частоту і т. д.) або навести посилання на літературу, в якій є ці формули.
- Нумерація списку публікацій здобувача в додатку А розпочинається з 26, а не з 1, що вважаю технічною помилкою.
- У роботі зустрічаються окремі неточності та неузгодженість відмінків у деяких реченнях.

Вказані зауваження не мають принципового характеру і не впливають на загальне позитивне враження від роботи. У цілому науковий рівень дисертації, новизна одержаних результатів, їх достовірність, наукове та практичне значення не викликають сумнівів.

Загальний висновок. Дисертація Жиденка Іллі Володимировича «Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки» є завершеною науковою працею, яка містить вирішення актуальної науково-прикладної задачі комплексного дослідження нанокompозитів з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки.

Дисертація за своєю актуальністю, науковою новизною, практичним значенням одержаних результатів, обґрунтованістю основних положень та висновків повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від

12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», вимогам освітньо-наукової програми, яку успішно завершив здобувач, 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 12 січня 2022 р. № 44), а її автор Жиденко Ілля Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка».

Офіційний опонент,
професор кафедри фізики та вищої математики
Луцького національного технічного університету,
Доктор фізико-математичних наук, професор



Сергій ЛУНЬОВ

Підпис д.ф.-м.н., проф. С. Луньова засвідчую:



ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:
вчений секретар
ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
професор Алла ЗЕМКО

