

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

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора

ЦІЖА Богдана Романовича

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»

1. Актуальність теми дисертації

Розроблення матеріалів з підвищеною вогнетривкістю є критично важливою для зменшення ризику пожеж та їх наслідків, які завдають величезних збитків як у фінансовому, так і в людському вимірах. Полімерні нанокompозити з додаванням вуглецевих нанотрубок можуть забезпечити кращий захист будівельних конструкцій, транспортних засобів та інших важливих об'єктів інфраструктури, адже унікальне поєднання фізико-хімічних властивостей, може значно покращити механічні, електричні та теплові характеристики цих матеріалів.

Сенсорні системи нового покоління потребують матеріалів з високою чутливістю та стабільністю в умовах зовнішніх впливів, таких як іонізуюче випромінювання – розгляд цього аспекту у дисертації демонструє інноваційний підхід до аналізу багатопараметричних явищ. Проведене вивчення температурної залежності електричних властивостей нанокompозитів у широкому діапазоні температур є важливим для розроблення матеріалів, здатних працювати в екстремальних зовнішніх умовах.

Отже, дисертація Жиденка І.В. є **актуальною**, оскільки вона сприяє впровадженню нових високоефективних матеріалів, що у підсумку покращує безпеку та функціональні можливості сенсорних систем, а також надає нові інструменти для дослідження і оптимізації нанокompозитів, що має значний науковий та практичний інтерес.

Актуальність дисертації підтверджується також участю автора в науково-дослідних темах в рамках наукового напрямку кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» «Розробка нових підходів до побудови засобів електронної техніки, методів моделювання та дослідження інноваційних технологій в електроніці, оптоелектроніці та сенсоріці», а також в рамках науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України для молодих учених «Функціональні наноматеріали для адаптивного роботизованого інформаційно-вимірювального комплексу оборонного спрямування» (№ державної реєстрації 0119U100435) та «Оптимізовані нанокompозити та сенсорні структури для оборонних систем контролю безпеки та виявлення загроз» (№ державної реєстрації 0116U004411).

Поставлена у дисертації **мета** дисертаційного дослідження досягнута в результаті застосування сучасних методів наукових досліджень структурних та фізичних властивостей нанокompозитів, одержаних на основі полімерної матриці з додаванням вуглецевих нанотрубок різних типів і концентрацій, а також результатів комп'ютерних симуляцій електропровідності у композитних системах нанотрубки/діелектрик з використанням алгоритмів моделювання перколяційних процесів та оптимізації параметрів.

2. Найважливіші наукові результати дисертації та їх новизна

До найважливіших наукових результатів автора дисертації слід віднести наступні:

1. Одержано епоксидні нанокompозити та нанокompозити на основі PEDOT з вмістом одно- та багатостінкових нанотрубок. Проведено аналіз їх морфологічних відмінностей, який показав, що зразки з одностінковими нанотрубками мають рівномірніший розподіл нанотрубок у полімерній матриці, тоді як зразки з багатостінковими нанотрубками демонструють тенденцію до утворення агломератів.

2. Запропоновано автоматизовану установку та методики для вимірювання електричних характеристик та термічного відгуку полімерів з додаванням нанорозмірних наповнювачів. Проведено налаштування апаратної складової та програмного забезпечення для досягнення оптимальних параметрів експлуатації цих установок, максимальної точності та відтворюваності результатів імпедансних та термічних вимірювань.

3. Реалізовано комп'ютерні симуляції перколяційних процесів у 3D, результати яких дозволяють спрогнозувати електропровідність та термічні влас-

тивості нанокompозитів та сприяють оптимізації процесів синтезу та підбору параметрів вогнетривких матеріалів для сенсорної електроніки. Показано, що при відстані тунелювання у межах 1,5...3 нм провідність нанокompозиту досягає 50 См/м при об'ємній концентрації нанотрубок 2%.

4. Показано, що додавання вуглецевих нанотрубок змінює температурну залежність латерального імпедансу полімерних шарів. Виявлено ефект гістерезису опору, який обумовлений різницею в коефіцієнтах теплового розширення між полімерною матрицею та наповнювачем.

5. Встановлено, що додавання вуглецевих нанотрубок підвищує електропровідність нанокompозитів та їх чутливість до β - і γ -випромінювання, що робить їх перспективними для застосування в умовах радіаційного впливу.

6. Запропоновано автоматизований підхід до дослідження термічного профілю циліндричних зразків нанокompозитів, у рамках якого показано відмінності для нанокompозитів з різними параметрами, які проявляються в умовах перепаду температур і термічних навантажень. На основі порівняльного аналізу динаміки передачі тепла оцінено, що збільшення часу диспергування на 1 год. покращує вогнетривкість на 15%, а заміна одностінкових вуглецевих нанотрубок на багатостінкові при інших ідентичних умовах покращує вогнетривкість кінцевого нанокompозиту на 25%.

3. Практичне значення результатів роботи визначається можливістю використання одержаних результатів дослідження при розробленні нанокompозитів з контрольованою електропровідністю та чутливістю до зовнішніх фізичних полів, що дасть можливість створювати сенсорні системи, здатні до самодіагностики свого функціонального стану та адаптивні до змін у навколишньому середовищі. Розроблена методика аналізу температурних профілів може бути корисною для інженерів, які створюють нові багатофункціональні матеріали для протипожежного захисту.

4. Загальна оцінка роботи

Дисертація Жиденка І.В. є завершеною науковою роботою, яка містить нові, науково обґрунтовані результати комплексних досліджень. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг основного тексту дисертації становить 169 сторінок, 90 рисунків, 2 таблиці, список використаної літератури з 128 найменувань на 14 сторінках, додатки на 10 сторінках.

У першому розділі дисертації «Нанокompозитні матеріали та їх застосування у сучасній сенсорній електроніці» представлено огляд наукової літератури за темою дисертації, зокрема, проведено аналіз особливостей одержання нанокompозитів, теоретичних та експериментальних методів їх дослідження, перспективних для розвитку електроніки. Відзначено, що, незважаючи на значний обсяг досліджень в даній області, існує ряд проблем, які необхідно вирішити, зокрема, щодо впливу вмісту нанотрубок на їх вогнетривкість, електричну провідність, застосування нанокompозитів на основі нанотрубок як захисних покриттів для сенсорних систем, електронної апаратури, що є важливим та перспективним напрямком дослідження.

Другий розділ роботи «Методологія одержання та дослідження нанокompозитів» присвячено процесу одержання нанокompозитів з одно- та багатостінковими нанотрубками, а також опису експериментальних методик їх дослідження та теоретичних моделей для комп'ютерних симуляцій. Детально розглянуто методологію та програмно-апаратне забезпечення для електричної характеристики нанокompозитів. Продемонстровано специфіку проведення експериментів методами імпеданс-спектроскопії, що включає підходи до опрацювання одержаних спектрів імпедансу за різними алгоритмами, процедуру відбору та аналізу результатів. Представлено детальний огляд запропонованої методики вимірювання термічних властивостей полімерів з додаванням вуглецевих нанотрубок, включаючи опис необхідного обладнання, умов проведення вимірювань та аналізу одержаних даних. Описано технічні аспекти використання програмного забезпечення для симуляцій, що дозволяє моделювати поведінку нанокompозитів під різними умовами експлуатації. Розглянуто можливості програмно-апаратних комплексів для точного визначення електричних характеристик нанокompозитів (провідності, діелектричних властивостей та впливу температури і радіаційного випромінювання), методику вимірювання термічних властивостей полімерів з домішками вуглецевих нанотрубок, зокрема методи визначення теплопровідності, теплоємності та температурної стабільності.

У третьому розділі дисертації «Комп'ютерні експерименти з встановленням визначальних функціональних властивостей нанокompозитів» представлено результати комп'ютерних симуляцій властивостей нанокompозитів з вмістом нанотрубок. Представлено результати моделювання електричної провідності системи карбонових нанотрубок з використанням розробленого програмного забезпечення. В результаті проведених розрахунків електропровідності за перколяційним підходом розроблено модель системи з нанотру-

бками у діелектричному середовищі, яка відображає властивості реального нанокompозиту на основі вуглецевих нанотрубок. Показано, що ймовірність формування провідного шляху суттєво залежить від орієнтації нанотрубок, а для більших концентрацій орієнтованих нанотрубок максимальний поріг перколяції спостерігається для елементів довжиною 2-3 мкм. Шляхом розрахунків для моделі, у якій передбачено можливість вигину нанотрубки, а відношення довжини до діаметру становить 120, показано, що об'ємна частка нанотрубок, при якій існує провідний шлях, становить 0,31%.

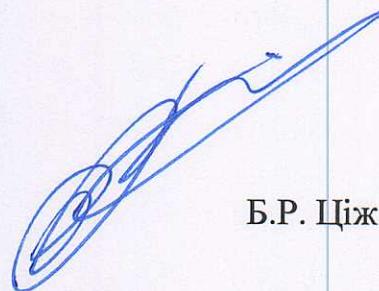
У четвертому розділі дисертації «Експериментальні дослідження властивостей нанокompозитів, що визначають їх вогнетривкість» представлено комплекс експериментальних досліджень властивостей нанокompозитів на основі полімерів з одно- та багатостінковими вуглецевими нанотрубками. Проведено комплексне дослідження змін електричного опору нанокompозитних структур в залежності від температури, частоти прикладеної змінної напруги та дози поглинутого бета- і гама-випромінювання. Показано, що додавання нанотрубок до полімеру підвищує електропровідність та покращує чутливість до радіаційного впливу. Досліджено термічні властивості нанокompозитів, які визначають їх вогнестійкість. Встановлено, що ступінь диспергування нанотрубок у полімерній матриці впливає на вогнезахисну ефективність нанокompозитів. Показано, що збільшення часу диспергування нанокompозитів сприяє підвищенню їх вогнетривкості на 15%. Встановлено, що оптимальний концентраційний діапазон для досягнення термічної стабільності та теплопровідності становить 1,5...2,5%. Показано, що полімерні епоксидні нанокompозити з додаванням багатостінкових нанотрубок мають більшу здатність до розсіювання тепла, покращену механічну міцність і бар'єрні властивості, що робить їх більш вогнетривкими порівняно з композитами з вмістом одностінкових нанотрубок.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків дисертації

Основні результати дисертації опубліковані у провідних закордонних періодичних виданнях та фахових виданнях України, вони широко обговорювалися за безпосередньої участі автора на профільних наукових конференціях та семінарах міжнародного рівня. Для проведення дослідження автор використав сучасні, добре апробовані експериментальні методи. Опрацювання та аналіз одержаних результатів, а також математичне моделювання здійснено з використанням сучасних програмних засобів та теоретичних підходів. Все вище-

Вважаю, що представлена дисертація «Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки» є завершеною науково-дослідницькою роботою, яку виконано на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів та теоретичних підходів і повністю відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор, Жиденко Ілля Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка».

Офіційний опонент, доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри загальнотехнічних
дисциплін Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького



Б.Р. Ціж

Підпис проф. Б.Р. Ціжа завіряю

Вчена секретарка Львівського національного
університету ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького
кандидатка сіл.-госп. наук, доцентка



І.М. Сливка