

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

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри матеріалознавства та інженерії матеріалів
Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту
Національного університету «Львівська політехніка»,

доктора технічних наук, доцента

КУЛИКА Володимира Володимировича

на дисертаційну роботу

ЖИДЕНКА Іллі Володимировича:

**“Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною ефективністю
для сенсорної електроніки”**,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 171 – Електроніка,
галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

1. Актуальність теми

На сьогоднішній день інноваційні матеріали відіграють ключову роль у розвитку високотехнологічних галузей. До таких матеріалів відносяться і модифікації полімерних нанокompозитів, зокрема на основі полі(3,4-етилендіокситіофену) та епоксидних матриць. Особливо актуальним є дослідження таких нанокompозитів із додаванням вуглецевих нанотрубок, які мають потенціал значно підвищити вогнетривкість матеріалів, розширюючи спектр практичних застосувань у різних галузях.

Продумана комбінація сучасних методів досліджень, таких як сканувальна електронна мікроскопія та імпедансна спектроскопія, а також комп'ютерне моделювання перколяційних процесів, представлене у дисертації, забезпечує глибше розуміння структурних і електричних властивостей нанокompозитів. Це сприяє оптимізації технологічних процесів, забезпеченню кращих експлуатаційних характеристик при знижених витратах та загальному підвищенню ефективності розробки матеріалів з дотриманням вимог до термічної стійкості та екологічної безпеки.

Усі згадані чинники визначають актуальність дослідження нанокompозитів з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки проведеного у дисертації І.В. Жиденка.

2. Аналіз структури та змісту дисертації

Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку.

У вступі окреслено актуальність теми дисертації, мету, завдання дослідження, продемонстровано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, відзначено наукову новизну результатів, їх практичне значення, особистий внесок дисертанта, описано об'єкт, предмет та методи дослідження.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела щодо особливостей одержання та дослідження нанокompозитів, у тому числі в вмістом вуглецевих нанотрубок та їх перспективи застосування як вогнетривких матеріалів, відзначено завдання, які необхідно вирішити.

У другому розділі представлено особливості одержання нанокompозитів з вмістом одно- та багатостінних нанотрубок, а також експериментальні методики їх дослідження та теоретичні моделі для комп'ютерних симуляцій. Описано методологію, а також програмно-апаратне забезпечення для електричної характеристики нанокompозитів. Представлено методику вимірювання термічних властивостей полімерів з домішками вуглецевих нанотрубок.

У третьому розділі представлено результати теоретичних досліджень нанокompозитів, сформованих додаванням нанорозмірних елементів наповнення у діелектричну матрицю. Запропонована система чисельного моделювання нанотрубок у діелектричному середовищі, яка дозволяє параметризацію властивостей та візуалізацію результатів з використанням різних формалізмів опису електропровідності.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень властивостей нанокompозитів. Показано, що додавання нанотрубок до полімеру підвищує електропровідність та покращує чутливість до радіаційного впливу. Виявлено ефект зміни опору обох підсистем нанокompозиту під дією бета- та гамма-випромінювання. Досліджено термічні властивості нанокompозитів, які визначають їх вогнестійкість. Встановлено, 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 нанокompозитами з вмістом одностінних нанотрубок.

Висновки містять інформацію щодо основних наукових результатів роботи.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень та висновків у дисертації є достатньою і базується на детальному аналізі джерел за даною проблемою, чіткій постановці задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, правильним

застосуванням математичного апарату та апробованих експериментальних методів дослідження при розгляді наукових положень дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації Жиденка І.В. є комплексними та виходять із її вмісту, відображаючи одержані дослідником результати.

Достовірність та обґрунтованість представлених методів і засобів підтверджується результатами досліджень та коректним застосуванням методів, які були використані під час виконання роботи. Достовірність одержаних результатів також забезпечується виконаними автором дослідженнями, публікаціями у періодичних закордонних виданнях та фахових виданнях України, апробацією одержаних наукових результатів та їх впровадженням.

4. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

- Спрогнозовано електричні властивості полімерних нанокompозитів та оптимальні параметри для досягнення перколяції з урахуванням геометрії нанотрубок, просторового розподілу нанотрубок і тунельного ефекту шляхом комп'ютерної симуляції перколяційних процесів на моделі нанокompозиту. Показано, що при відстані тунелювання у межах 1,5-3 нм провідність нанокompозиту досягає 50 См/м при об'ємній концентрації нанотрубок 2%. Збільшення відношення довжини нанотрубок до діаметра ≤ 120 , дозволяє досягнути провідності 90 См/м при концентрації не більшій за 0,05%.

- Побудовано еквівалентну електричну схему заміщення на основі експериментальної імпедансної спектроскопії на ділянці частот від 100 Гц до 1 МГц, у якій ємність елементу постійної фази зростає від $1,86 \times 10^{-7}$ Ф для концентрації нанотрубок 0,5% та до $1,26 \times 10^{-6}$ Ф для концентрації нанотрубок 2,5%.

- Встановлено, що одночасний вплив β -випромінювання з середньою енергією 0,17 МеВ та γ -випромінювання з середньою енергією 0,19 МеВ збільшує електричний опір нанокompозитів на 2 кОм. Радіаційні дефекти, які створюються після поглинання дози випромінювання, призводять до створення рівнів захоплення, що вивільняються і дають внесок у електропровідність нанокompозитів у межах температур 230–260 К.

- Визначено, що ступінь диспергування нанотрубок у полімерній матриці відіграє значну роль у регулюванні вогнезахисної ефективності нанокompозитів. Для теплового профілю зразків з часом диспергування нанотрубок 2 год характерною є пікова різниця температур у 55 °С, тоді як для зразків з часом диспергування нанотрубок 1 год така різниця не перевищує 50 °С. На основі порівняльного аналізу динаміки передачі тепла оцінено, що збільшення часу диспергування на 1 год покращує вогнетривкість на 15%.

- Встановлено вплив типу та концентрації нанотрубок з чистотою понад 95% на термічні характеристики полімерних нанокompозитів. Оптимальний

концентраційний діапазон для досягнення покращеної термічної стабільності та теплопровідності має межі 1,5-2,5%, а заміна одностінкових вуглецевих нанотрубок на багатостінкові при інших ідентичних умовах покращує вогнетривкість кінцевого нанокompозиту орієнтовно на 25%.

5. Практичне значення одержаних результатів

У результатах дослідження наведено інформацію про технологію і умови виготовлення, особливості структурної інженерії та пов'язані з цим покращення вогнестійких властивостей нанокompозитів. Ці знання можуть бути використані для створення нових матеріалів з покращеними вогнезахисними властивостями. Нанокompозити з регульованою електропровідністю та чутливістю до зовнішніх фізичних полів дозволять розробити сенсорні системи нового покоління, здатні 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 властивостей нових матеріалів, що сприяє швидшому впровадженню інновацій у виробництво. Одержані результати досліджень дисертації також впроваджено у навчальний процес.

6. Повнота відображення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих автором дисертації працях

Результати дослідження опубліковано достатньо повно. Основні положення дисертації опубліковані автором у 25 наукових працях, із них 6 статей у наукових фахових виданнях України та періодичних закордонних виданнях, 19 праць у збірниках доповідей наукових конференцій, 5 з яких індексуються у наукометричній базі даних Scopus. Основні положення та результати дослідження, представлені у дисертації, оприлюднені та обговорені на міжнародних науково-практичних конференціях, а саме: International Conferences on Electronics and Nanotechnology ELNANO (Kyiv, Ukraine, 2019, 2020, 2022), 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET (Lviv, Ukraine, 2022), 13th International Conference “Nanomaterials: Applications & Properties” NAP (Bratislava, Slovakia, 2023), International Research and Practice Conferences “Nanotechnology and Nanomaterials” NANO (Lviv, Ukraine, 2019, 2020; 2021, 2022; Bukovel, Ukraine, 2023), Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering (Belgrade, Serbia, 2019, 2022), International Conference E-MRS Fall Meeting (Warsaw, Poland, 2023), 10th International Conference “Relaxed, Nonlinear and Acoustic Optical Processes and Materials” dedicated to the memory of Oleh Parasyuk and Iwan Kityk RNAOPM-2020 (Lutsk–Lake «Svityaz'», Ukraine, 2020), Young Scientists Conferences on Semiconductor Physics «Lashkaryov's readings» (Kyiv, Ukraine, 2023, 2024), а також

на наукових семінарах кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка».

Таким чином, наукові результати, які описані у дисертації, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача. Кількість публікацій, їх повнота у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

7. Оформлення, мова та стиль дисертації

Дисертацію написано українською мовою, на хорошому стилістичному рівні. Застосована у роботі наукова термінологія є загально визнаною, стиль викладення результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Стиль викладу матеріалів досліджень і наукових положень забезпечує їх належне сприйняття. Оформлення дисертації відповідає усім необхідним вимогам.

Тема, зміст та одержані наукові результати відповідають спеціальності 171 – Електроніка, галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації.

8. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертації та публікацій аспіранта Жиденка Іллі Володимировича порушень академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації тексту у роботі відсутні.

9. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

1. У роботі недостатньо висвітлено результати довготривалих експериментів, які б показали стабільність термічних властивостей нанокompозитів при тривалому впливі високих температур.
2. Робота переважно зосереджується на лабораторних умовах, тоді як практичні випробування матеріалів у реальних умовах експлуатації (високі температури, механічні навантаження, волога) не були проведені у достатньому обсязі.
3. Частина опису експериментальних досліджень зосереджені у 4 розділі, тоді як їх доцільно було б представити у розділі 2, який є методологічним, а розділ 1 перенасичений описом різноманітних методів отримання наноматеріалів, тоді як доцільно було б зосередитися на технологічних рішеннях щодо нанокompозитів з вмістом нанотрубок.
4. У роботі зустрічаються англomовні та україномовні скорочення, наприклад, для вуглецевих нанотрубок (CNT, BHT). Доцільно було б все подавати у одних скороченнях.
5. У роботі зустрічаються дрібні неточності і помилки, на с. 101 розділу 2 відсутні посилання на літературу.

Варто зазначити, що наведені зауваження не знижують загального враження та позитивної оцінки представленого дисертаційного дослідження.

Висновки щодо дисертації

Дисертація Жиденка Іллі Володимировича «Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 – Електроніка, галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації, є завершеним та цілісним самостійним науковим дослідженням, містить достатню наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Зміст дисертації «Нанокompозити з підвищеною вогнезахисною ефективністю для сенсорної електроніки» відповідає обраній темі, забезпечує досягнення поставленої мети і вирішення завдання дослідження. Вказані зауваження щодо представленого дослідження не знижують вагомості одержаних у роботі наукових та практичних результатів і не змінюють позитивної оцінки.

З огляду на актуальність проблеми, вкладу автора у вирішення поставленого завдання, відсутності порушень академічної доброчесності вважаю, що дисертація цілком відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а здобувач Жиденко Ілля Володимирович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 – Електроніка із галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації.

Рецензент:

професор кафедри матеріалознавства
та інженерії матеріалів

Національного університету
«Львівська політехніка»

д.т.н., доцент



Володимир КУЛИК

**Підпис д.т.н., професора Володимира КУЛИКА
«ЗАСВІДЧУЮ»**

Вчений секретар

Національного університету
«Львівська політехніка»

к.т.н., доцент

« 26 » липня 2024 р.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ