

УДК 678.5:536.24:621.3.049

doi: 10.32620/aktt.2025.2.05

О. М. ЛІСТРАТЕНКО¹, Ю. О. ШЕПЕТОВ², О. В. КРАВЧЕНКО^{1,3},
І. В. БОРЦОВ^{1,4}, Б. І. ПОДЛЕСНИЙ^{1,2}

¹ ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

³ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

⁴ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ТЕРМОІНТЕРФЕЙСНІ КОМПОЗИЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ

Предметом статті є аналіз і розробка нових термоінтерфейсних композиційних полімерних матеріалів, що використовуються для покращеного тепловідведення в електроніці. Метою роботи є створення ефективних композитів на основі поліїмідів і силіконових сполучних речовин з використанням наповнювачів з нітриду алюмінію. Застосування мінінаповнювачів з порошків білого нітриду алюмінію з мікронними розмірами часток у полімерних матрицях дозволяє забезпечити можливість створення нових композиційних матеріалів з підвищеною теплопровідністю для використання в процесах збирання та герметизації електронних пристроїв. Використані методи включають чисельне моделювання теплопровідності за допомогою програмного комплексу COMSOL Multiphysics та експериментальні дослідження теплопровідності методом стаціонарного теплового потоку. Результати полягають у тому, що у теоретичних моделях термоінтерфейсних композиційних матеріалів, що розроблялись, у якості мінінаповнювачів полімерних матриць, використовувались порошки AlN з розмірами часток 10 мкм з величиною теплопровідності порядку 50-60 Вт/(м·К), що було експериментально підтверджено при дослідженні процесів їх агрегації у дисперсних розчинах полімерів при виготовленні теплопровідних композитних ПП та силіконових матеріалів. При концентрації частинок AlN у композитів середнього наповнення з 45 об. % теплопровідність дослідних зразків термоінтерфейсних матеріалів, досягає 1,09 Вт/(м·К), що збігається з теоретичними прогнозами. У висновках зазначено, що такі матеріали можуть значно підвищити ефективність тепловідведення в електронних пристроях, а також знайти застосування в аерокосмічній, енергетичній та інших галузях промисловості.

Ключові слова: термоінтерфейсні матеріали; композитні полімери; теплопровідність; наповнювачі; тепловідведення; мікро-електроніка; модифікація поверхні.

Вступ

1.1. Мотивація

Сфера дослідження належить до галузі матеріалознавства, зокрема — до розробки термоінтерфейсних композиційних полімерних матеріалів для електроніки. Актуальність проблематики обумовлена потребою в ефективному тепловідведенні для забезпечення надійності, довговічності та високої продуктивності електронних пристроїв. Існуючі термоінтерфейсні матеріали на основі полімерів не завжди задовольняють вимоги сучасних високотехнологічних застосувань, особливо в умовах підвищених теплових навантажень. Проблема полягає в необхідності створення матеріалів з покращеними теплопровідними властивостями при збереженні їх технологічності та ізоляційних характеристик [1].

Серед сучасних полімерних композиційних матеріалів поліорганосілоксанові (силіконові) та поліїмідні (ПП) матеріали займають лідируюче місце завдяки термостійкості та високим показникам міцності [2]. Вони мають набагато меншу вагу в порівнянні з керамікою та металами, високі електроізоляційні властивості та достатньо високу стійкість до розчинників [3]. У свою чергу нітрид алюмінію (AlN) у якості наповнювача є єдиним технічним керамічним матеріалом, який має вкрай високу теплопровідність порядку 170-230 Вт/(м·К) та відмінні ізоляційні властивості [4]. Застосування наповнювачів з порошків білого нітриду алюмінію з мікронними розмірами часток у полімерних матрицях дозволяє забезпечити можливість створення нових композиційних матеріалів з підвищеною теплопровідністю для використання в процесах збирання та герметизації електронних пристроїв.



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

Попередні дослідження в цій галузі продемонстрували перспективність використання поліорганосилоксанів, поліімідів та наповнювачів з нітриду алюмінію для формування композитів з підвищеною теплопровідністю. Однак, багато аспектів, таких як оптимізація складу та структура матриць, залишаються відкритими. Ця стаття присвячена вирішенню вищезазначених задач шляхом розробки, моделювання та експериментального підтвердження ефективних термоінтерфейсних полімерних композиційних матеріалів.

1.2. Сучасний стан досліджень

Сучасні дослідження висвітлюють різні підходи до підвищення теплопровідності полімерних матеріалів, зокрема, через введення наповнювачів, таких як AlN, у матриці з поліімідів або силіконів. При цьому, більшість досліджень зосереджуються на окремих аспектах — типі наповнювача, співвідношенні фаз, або на методах вимірювання теплопровідності.

В тому числі компанія ТОВ «НВП «ЛТУ» розробляє та застосовує гнучкі теплопровідні фольговані ПІ діелектрики широкої номенклатури на основі фольги з нікелю, нікелевих і інших резистивних сплавів, мідної, алюмінієвої фольги і фольги з інших металів, в тому числі з збільшеною теплопровідністю ПІ шарів. Гнучкі теплопровідні лакофольгові поліімідні матеріали виготовляються широкої номенклатури з шарами тонких (25-30 мкм) теплопровідних ПІ композитів середнього та високого наповнення (40-70 об. %) з підвищеною теплопровідністю в діапазоні від 0,8 Вт/(м·К) до 2,0 Вт/(м·К) та більше при температурі від -200 С до +250 С. Розробляються також теплопровідні діелектричні композитні силіконові еластомери середнього наповнення, які застосовуються для виготовлення теплопровідних еластичних прокладок та теплопровідних плівкових електричних ізоляторів для ізолювання посадочних поверхонь напівпровідникових приладів при монтажі, а також як діелектричний матеріал в електроніці та теплотехніці. Інтенсивне тепловідведення через ізоляційну підкладку гарантується застосуванням порошкових мінінаповнювачів із порошків з нітриду алюмінію з мікронними розмірами. Матеріали, що розробляються, суттєво знижують вартість монтажу за рахунок зменшення трудомісткості та заміни композитних теплопровідних паст і компаундів інших типів та виробників при виробництві.

У статті виконано розширені дослідження ефективних полімерних композитів шляхом комплексного підходу: структурного моделювання, виготовлення та експериментального вивчення властивостей дослідних зразків [5].

1.3. Мета та задачі дослідження

Мета даної роботи — розробка та дослідження нових термоінтерфейсних композиційних полімерних матеріалів з підвищеною теплопровідністю, придатних для використання в електронних системах охолодження.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести теоретичне моделювання теплопровідності полімерних композитів на основі ПІ та силіконових матриць з мікронаповнювачами AlN.
2. Виготовити зразки композиційних матеріалів з різним об'ємним вмістом AlN.
3. Провести експериментальні дослідження теплопровідності зразків за допомогою методу стаціонарного теплового потоку.
4. Порівняти отримані результати з теоретичними даними.
5. Оцінити потенціал практичного застосування розроблених матеріалів.

1. Предмет та методи дослідження

При розробці та дослідженні теплопровідних властивостей нових композиційних термоінтерфейсних полімерних матеріалів на основі теплопровідних композиційних ПІ та силіконових матеріалів було проведено теоретичні розрахунки ефективних коефіцієнтів їх теплопровідності за допомогою методу прямого моделювання теплопровідності середовищ зі складною структурою, який дає змогу проводити розрахунки ефективної теплопровідності для різного розташування частинок порошків теплопровідних мінінаповнювачів у сполучних матеріалах. При моделюванні ПІ композитів як прекурсор ПІ матриці був обраний розчин поліамідокислоти Pyge ML RC 5069, а як мінінаповнювач матриці - порошки білого AlN з розмірами часток 10 мкм. При моделюванні силіконового композиту в якості матриці був обраний силіконовий полімер СКТН-А та мінінаповнювач матриці також порошки білого AlN з розмірами часток порядку 10 мкм.

За допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS були виконані розрахунки усереднених теплових потоків та отримані оціночні значення ефективних коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних силіконових та ПІ композиційних матеріалів, які проектувалися залежно від об'єму середньо наповнених теплопровідних мінінаповнювачів.

Для спрощення розрахункової моделі композиційних систем було прийнято ряд основних допущень:

1. Задача розглядається як стаціонарна, оскільки вирівнювання температури в теплопровідному об'ємі відбувається значно швидше, ніж зміна зовнішніх умов.

2. Матеріали, складові композита, вважаються ізотропними. При цьому їх теплопровідність не залежить від температури.

3. Розміри часток наповнювача вважаються однаковими. Фракційний склад часток не враховується.

4. Тепловий контакт між частками та полімером приймається ідеальним (дане припущення призводить до зростання теплопровідності композиту внаслідок нульового теплового опору на межі середовищ полімер – частка).

5. Наявність мікрodefektів не враховується [5].

Результати теоретичних розрахунків ефективної теплопровідності досліджених моделей композиційних полімерних систем при різних об'ємних концентраціях наповнювачів представлено на рис. 1.

З графіку на рис. 1, а випливає, що для моделі ПІ композиту з наповнювачем, який складається з часток білого AlN сферичної форми з діаметром 10 мкм при концентрації часток у ПІ матриці 50 об. %, розрахункова ефективна теплопровідність становить 0,72 Вт/(м•К). З графіку на рис. 1, б випливає, що для моделі силіконового композиту з наповнювачем, який складається з часток білого AlN сферичної форми з діаметром 10 мкм при концентрації часток у силіконовій матриці 50 об. %, розрахункова ефективна теплопровідність становить 1,24 Вт/(м•К). Таким чином, за результатами моделювання теоретично підтверджено можливість виготовлення нових середньонаповнених мікрокомпозиційних полімерних матеріалів з підвищеною теплопровідністю до майже 1,25 Вт/(м•К) при концентрації часток AlN наповнювачів порядку 50 об. %.

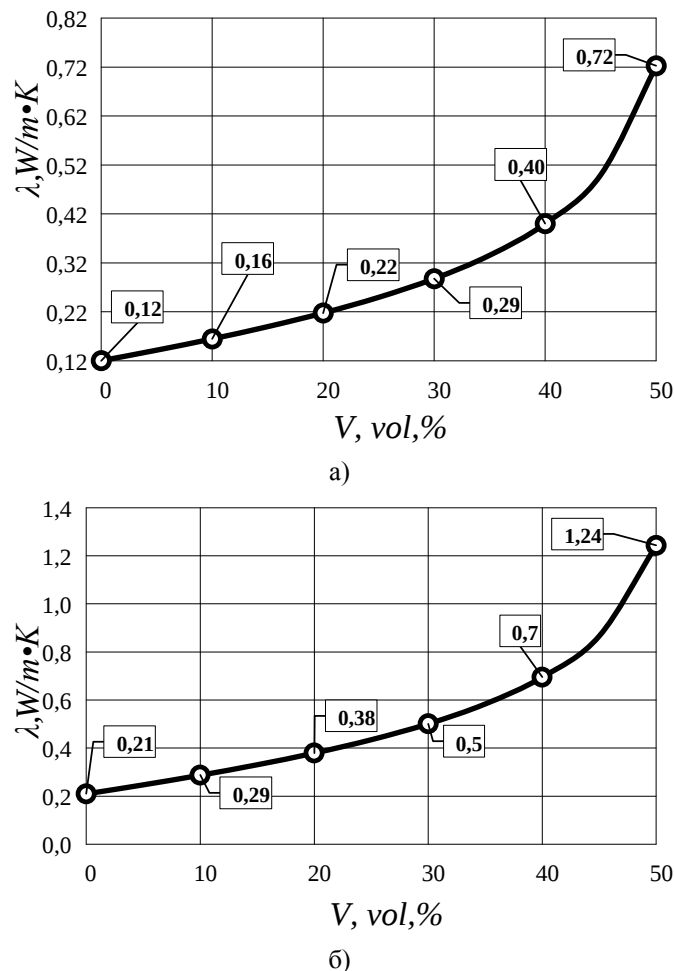


Рис. 1. Ефективна теплопровідність композиційних полімерних систем при різних об'ємних концентраціях мінаповнювачів з білого порошку AlN з розмірами часток AlN порядку 10 мкм:

а) теплопровідний композиційний ПІ матеріал (PI+AlN); б) теплопровідний композиційний силіконовий матеріал (СКТН-А + AlN)

2. Експериментальні дослідження теплопровідності композиційних полімерних матеріалів

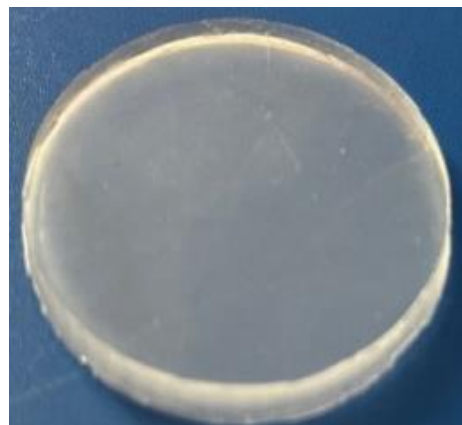
Для експериментальних досліджень теплопровідності композиційних полімерних матеріалів було виготовлено дослідні зразки теплопровідних композиційних ПП плівок товщиною 25 – 30 мкм на основі сполучного матеріалу з розчину поліамідної кислоти Pyre ML RC 5069 (США) та дослідні зразки теплопровідних композиційних силіконових підкладок товщиною від 250 мкм до 4 мм на основі широко використовуваного силіконового сполучного матеріалу СКТН-А з використанням мінінаповнювачів з високою теплопровідності білого порошку AlN з розмірами часток 8 - 10 мкм виробництва компанії SIGMA-ALDRICH Chemie GmbH (Німеччина).

Теплопровідності зразків композиційних полімерних матеріалів визначалися на лабораторному пристрої методом стаціонарного теплового потоку, який засновано на законі Фур'є, тобто теплопровідність визначалась за постійного температурного поля. Досліджувалися зразки силіконових підкладок з діаметром 50 мм та товщиною 4 мм на основі силіконового полімеру СКТН-А (Зразок 1) та зразків теплопровідних композиційних силіконових підкладок діаметром 50 мм з товщиною 4 мм на основі силіконового сполучного матеріалу СКТН-А та мінінаповнювачів з білого порошку AlN з розмірами часток порядку 10 мкм у кількості 30 об. % (Зразок 2) та 45 об. % (Зразок 3) (рис. 2).

На рис. 3 зображено теплову схему лабораторного пристрою для вимірювання теплопровідності композиційних полімерних матеріалів. Нагрівання та охолодження поверхонь дослідних зразків полімерних матеріалів 3 здійснюється за допомогою нагрівачу 1 та холодильнику 4. Для захисту дотичних поверхонь дослідних зразків, плоского нагрівачу та холодильнику від забруднень та від повітряних зазорів, дотичні поверхні ретельно оброблюються і притискаються один до одного з достатнім зусиллям. Товщина дослідних зразків підібрана таким чином, щоб забезпечувалось падіння температури, достатнє для надійного його виміру.

Для визначення температур поверхонь дослідних зразків використовуються мідь – константанові термопари 5, які розташовуються на підкладці з тонкої еластичної гуми 2 таким чином, щоб вимірювальні термопари щільно притискалися до поверхонь зразків. Значення температури поверхонь зразків зі сторони нагрівачу t_1 та значення температури поверхонь зразків зі сторони холодильнику t_2 вимірюються за допомогою потенціометру (ПП-63) у мілівольтах. Відповідно до таблиць градувальних харак-

теристик мідь-константанових термопар, температури робочих спаїв термопар вказуються як у мілівольтах, так і в градусах Цельсія.



а)



б)

Рис. 2. Дослідні зразки полімерних матеріалів, в тому числі теплопровідних композиційних силіконових дисків, з діаметром 50 мм за товщиною 4 мм на основі силіконового полімеру СКТН-А:
а) силіконовий матеріал (СКТН-А);
б) композиційний силіконовий матеріал (СКТН-А + мінінаповнювач з AlN)

У центрі холодильнику розташовується датчик для вимірювання та розрахунків щільності теплових потоків 6. Термоелектричний сигнал датчику вимірюється у мілівольтах. Коефіцієнт перетворення датчику визначається при його таруванні та дорівнює: $K_g = 71,5 \text{ Вт/м}^2 \times \text{мВ}$. Значення щільності теплових потоків розраховуються за виразом (1):

$$q = K_g \times E, \quad (1)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт/м^2 ;

K_g – коефіцієнт перетворення датчику, $\text{Вт/м}^2 \times \text{мВ}$;

E – термоелектричний сигнал датчику, мВ.

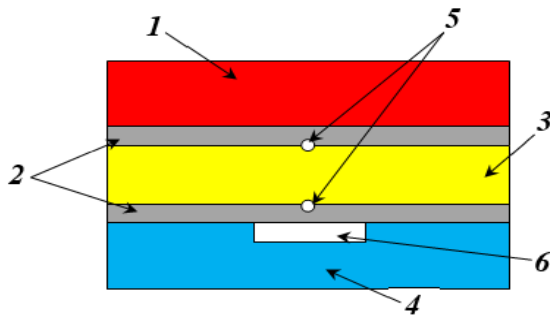


Рис. 3. Теплова схема лабораторного пристрою для вимірювання теплопровідності композиційних полімерних матеріалів:
1 – нагрівач; 2 – еластична гумова підкладка для покращення теплових контактів;
3 – дослідний зразок композиційного полімерного матеріалу; 4 – холодильник; 5 – термопари (мідь – константан); 6 – датчик для вимірювання та розрахунків щільності теплових потоків

Значення коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних зразків полімерних матеріалів розраховуються за виразом (2):

$$\lambda = q \frac{\delta}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

де λ – теплопровідність, Вт/(м·К);

δ – товщина, м;

q – щільність теплового потоку, Вт/м²;

t_1 – температура гарячої сторони, °С;

t_2 – температура холодної сторони, °С.

Результати експериментальних досліджень температур поверхонь теплопровідних композиційних силіконових дисків, розрахунків щільності теплових потоків та розрахунків теплопровідності зразків композиційних силіконових матеріалів за допомогою мідь – константанових термопар та датчику вимірювання щільності теплових потоків лабораторного пристрою представлені у табл. 1 та на рис. 4.

Отримані експериментальні дані вимірювання теплопровідності дослідних зразків середньонаповнених теплопровідних композиційних матеріалів на основі мікро- AlN часток для різних полімерних сполучних підтвердили очікувані теоретичні розрахунки ефективної теплопровідності досліджених теплових моделей композиційних полімерних систем, які були проведені за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS [5].

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень теплових властивостей та ефективної теплопровідності дослідних зразків композиційних силіконових матеріалів

Параметри дослідних зразків	Зразок 1 СКТН-А	Зразок 2 СКТН-А + AlN ~ 30 об. %	Зразок 3 СКТН-А + AlN ~ 45 об. %
Щільність теплового потоку, Вт/м²	832,97	1751,75	1954,81
Температура гарячої сторони, °С	35,00	32,50	29,50
Температура холодної сторони, °С	19,25	21,87	22,38
Товщина, м	0,004	0,004	0,004
Теплопровідність, Вт/(м·К)	~ 0,21	~ 0,66	~ 1,09

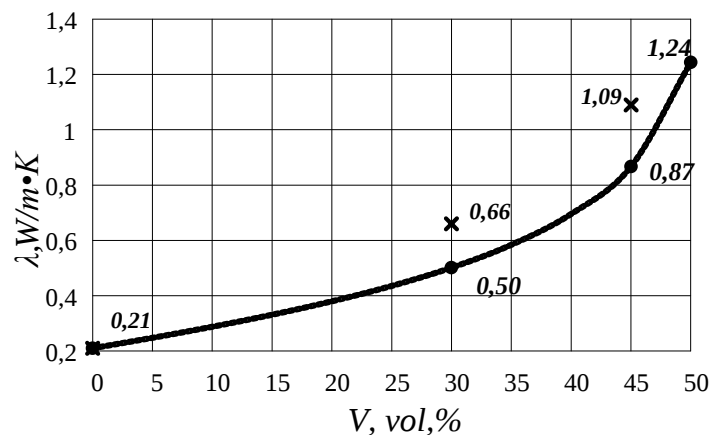


Рис. 4. Порівняння теоретичних та експериментальних даних теплопровідності зразків композиційних силіконових матеріалів, які досліджувалися: ● – теоретичні дані; х – експериментальні дані

3. Результати та їх обговорення

У силіконових підкладках виготовлених з силіконового полімеру марки СКТН-А теплопровідність, яка була досліджена за допомогою лабораторного пристрою, становила порядку 0,21 Вт/(м·К). У середньонаповнених теплопровідних композиційних матеріалів з концентрацією часток порошків AlN ~ 30 об. % теплопровідність становила порядку 0,66 Вт/(м·К). При концентрації часток порошків з AlN ~ 45 об. % теплопровідність теплопровідних композиційних матеріалів становила порядку 1,09 Вт/(м·К). Отримані результати об'єктивно підтверджують достатню точність розроблених авторами структурних теплових моделей та способів розрахунків ефективних теплопровідностей при проектуванні різних типів нових теплопровідних середньонаповнених (30...50 об. %) композиційних полімерних матеріалів. У теоретичних моделях термоінтерфейсних композиційних матеріалів, що розроблялись, у якості наповнювачів використовувались порошки AlN з розмірами часток 10 мкм з величиною теплопровідності порядку 50...60 Вт/(м·К), що було експериментально підтверджено зменшенням довідкової теплопровідності включень AlN часток порошкових наповнювачів при дослідженні процесів їх агрегації у дисперсних розчинах полімерів при виготовленні композитних матеріалів [6]. При цьому оптимальне співвідношення теплопровідності нових термоінтерфейсних композиційних полімерних матеріалів та їх прийнятної технологічності при виробництві (концентрація AlN наповнювачів порядку 30...50 об. %) досягаються за значеннями коефіцієнтів теплопровідності порядку 0,7...1,1 Вт/(м·К). Експериментальна перевірка підтвердила адекватність, технологічність та достовірність застосування інтегральних методів вимірювання теплопровідності у нових термоінтерфейсних композиційних середньонаповнених полімерних матеріалах, що були розроблені.

Висновки

Розроблені ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» нові силіконові та ПІ термоінтерфейсні теплопровідні та тепловідвідні композиційні матеріали можуть бути ефективно застосовані в електротехніці та радіоелектроніці, авіаційній, ракетно-космічній та інших галузях промисловості забезпечуючи суттєве зниження ваги і габаритів виробів, поліпшення їхньої надійності, питомої потужності і оптимальних температурних режимів експлуатації. В тому числі для концентраторних приймачів з використанням наземних багатоперехідних сонячних елементів та комбінованих друкованих плат на теплопро-

відних основах з тонкими теплопровідними композиційними поліімідними діелектриками, для гнучких плівкових електронагрівачів активних засобів терморегулювання для підтримки заданих діапазонів температур окремих елементів конструкцій космічних апаратів. Для умовно гнучких ультра легких сонячних модулів на гнучких алюміній - поліімідних носіях на основі тонких багато перехідних арсенід-галієвих сонячних елементів космічного призначення нового покоління з ККД 30% - 32% для сонячних батарей стратосферних БПЛА, квазі-супутників та супутників стандарту CubeSat [7].

Особистий внесок авторів: концепція та методологія – **О. М. Лістратенко**; формулювання задачі, аналіз результатів – **О. М. Лістратенко, Ю. О. Шепетов**; розробка моделі та програмне забезпечення – **О. В. Кравченко**; візуалізація та оформлення – **І. В. Борщов, Б. І. Подлесний**; підготовка тексту – всі автори.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів щодо цього дослідження, як фінансового, так і особистого чи авторського, що могло б вплинути на результати роботи.

Фінансування

Це дослідження проведено без спеціальної фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис має пов'язані дані у репозиторії даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні цієї роботи.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Present and future thermal interface materials for electronic devices [Text] / K. M. Razeeb, E. Dalton, G. L. Cross, A. J. Robinson // International Materials Reviews. – 2017. – Vol. 62, No. 1. – P. 1–21. DOI: 10.1080/09506608.2017.1296605.*

2. *Нові підходи для створення ефективних комбінованих друкованих плат на теплопровідних основах з діелектриками з поліімиду [Текст] / В. М. Бор-*

щов, О. М. Лістратенко, М. І. Сліпченко та ін. // *Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 215. – С. 60–68. DOI: 10.30837/rt.2023.4.215.06.

3. Дослідження теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками [Текст] / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, М. І. Сліпченко та ін. // *Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 217. – С. 139–147. DOI: 10.30837/rt.2024.2.217.13.

4. Ramisetty, M. Manufacturing of aluminium nitride powder for advanced applications [Text] / M. Ramisetty, S. Suri, & U. Kashalikar // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2014. – Vol. 93, No. 6. – P. 28–32.

5. Структурне моделювання та розрахунок теплопровідності поліімідних композиційних матеріалів [Текст] / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, М. А. Проценко та ін. // *Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 211. – С. 133–142. DOI: 10.30837/rt.2022.4.211.10.

6. Гнучкі теплопровідні поліімідні композиційні матеріали [Текст] / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, М. І. Сліпченко та ін. // *Functional Materials*. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 359–370. DOI: 10.15407/fm31.03.359.

7. Нові підходи до створення надлегких сонячних батарей для надмалих космічних апаратів [Текст] / В. М. Борщов, О. М. Лістратенко, М. А. Проценко та ін. // *Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 219. – С. 92–103. DOI: 10.30837/rt.2024.4.219.10.

References

1. Razeed, K. M., Dalton, E., Cross, G. L., & Robinson, A. J. Present and future thermal interface materials for electronic devices. *International Materials Reviews*, 2017, vol. 62, iss. 1, pp. 1–21. DOI: 10.1080/09506608.2017.1296605.

2. Borshchov, V. M., Listratenko, O. M., Slipchenko, M. I., Protsenko, M. A., Tymchuk, I. T., Kravchenko, O. V., & Borshchov, I. V. Novi pidkhody dlya stvorennia efektyvnykh kombinovanykh druko-

vanykh plat na teploprovodnykh osnovakh z dielektrykamy z poliimidu [New approaches to creating effective combined printed circuit boards on thermally conductive bases with polyimide dielectrics]. *Radiotekhnika*, 2023, vol. 215, pp. 60–68. DOI: 10.30837/rt.2023.4.215.06. (In Ukrainian).

3. Borshchov, V. M., Listratenko, O. M., Slipchenko, M. I., Protsenko, M. A., Tymchuk, I. T., Kravchenko, O. V., & Borshchov, I. V. Doslidzhennya teplovykh vlastyvostei elektronnykh moduliv na kombinovanykh platakh z poliimidnymy dielektrykamy [Thermal properties of electronic modules on combined boards with polyimide dielectrics]. *Radiotekhnika*, 2024, vol. 217, pp. 139–147. DOI: 10.30837/rt.2024.2.217.13. (In Ukrainian).

4. Ramisetty, M., Suri, S., & Kashalikar, U. Manufacturing of aluminium nitride powder for advanced applications. *American Ceramic Society Bulletin*, 2014, vol. 93, iss. 6, pp. 28–32.

5. Borshchov, V. M., Listratenko, O. M., Protsenko, M. A., Tymchuk, I. T., Kravchenko, O. V., Sydia, O. V., Borshchov, I. V., & Slipchenko, M. I. Strukturne modelivannia ta rozrakhunok teploprovodnosti poliimidnykh kompozytsiinykh materialiv [Structural modeling and calculation of thermal conductivity of polyimide composite materials]. *Radiotekhnika*, 2022, vol. 211, pp. 133–142. DOI: 10.30837/rt.2022.4.211.10. (In Ukrainian).

6. Borshchov, V. M., Listratenko, O. M., Slipchenko, M. I., Protsenko, M. A., Tymchuk, I. T., Kravchenko, O. V., & Borshchov, I. V. Hnuchki teploprovodni poliimidni kompozytsiyni materialy [Flexible thermally conductive polyimide composite materials]. *Functional Materials*, 2024, vol. 31, iss. 3, pp. 359–370. DOI: 10.15407/fm31.03.359. (In Ukrainian).

7. Borshchov, V. M., Listratenko, O. M., Protsenko, M. A., Tymchuk, I. T., Kravchenko, O. V., Bilousov, K. H., Perekopskyi, I. T., & Borshchov, I. V. Novi pidkhody do stvorennia nadlekhkikh sonyachnykh batarei dlya nadmalykh kosmichnykh aparativ [New approaches to the development of ultralight solar panels for nano-spacecraft]. *Radiotekhnika*, 2024, vol. 219, pp. 92–103. DOI: 10.30837/rt.2024.4.219.10. (In Ukrainian).

Поступила в редакцію 1.02.2025, рассмотрена на редколлегии 17.03.2025

THERMAL INTERFACE COMPOSITE POLYMER MATERIALS

*Oleksandr Listratenko, Yuriy Shepetov, Oleksandr Kravchenko,
Illia Borshchov, Bohdan Podlesnyi*

The **subject of the article** is the analysis and development of new thermally conductive composite polymer materials used for improved heat dissipation in electronics. The **goal** of the work is to create effective composites based on polyimides and silicone binders using aluminum nitride fillers. The use of microfillers made of white aluminum nitride powders with micron-sized particles in polymer matrices enables the development of new composite materials with enhanced thermal conductivity for use in the assembly and sealing of electronic devices. **The methods**

employed include numerical modeling of thermal conductivity using the COMSOL Multiphysics software suite and experimental studies of thermal conductivity by the steady-state heat flow method. **The results** show that in the theoretical models of the developed thermally conductive composite materials, aluminum nitride powders with a particle size of 10 μm and thermal conductivity of about 50–60 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ were used as microfillers in polymer matrices. This was experimentally confirmed by studying the aggregation processes of these powders in polymer dispersions during the fabrication of thermally conductive composite polyimide and silicone materials. At an average filler concentration of 45 vol.% AlN particles, the thermal conductivity of experimental samples of thermal interface materials reached 1.09 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, which corresponds well with theoretical predictions. **The conclusions** state that such materials can significantly improve heat dissipation efficiency in electronic devices and may find applications in the aerospace, energy, and other industrial sectors.

Keywords: thermal interface materials; composite polymers; thermal conductivity; fillers; heat dissipation; microelectronics; surface modification.

Лістратенко Олександр Михайлович – канд. техн. наук, провідний науковий співробітник, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», Харків, Україна,
e-mail: sasha.listratenko.12@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7643-5295.

Шепетов Юрій Олексійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна,
e-mail: i.shepetov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3045-9106.

Кравченко Олександр Вікторович – начальник відділу, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», Харків, Україна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна,
e-mail: kravchenkoaleksandr671@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7145-4304.

Борщов Ілля В'ячеславович – науковий співробітник, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ»; асистент каф. комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: illia.borshchov1@nure.ua, ORCID: 0000-0002-6598-6988.

Подлесний Богдан Ігорович – науковий співробітник, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ»; асп. каф. космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна,
e-mail: b.i.podliesnyi@khai.edu.

Oleksandr Listratenko – Cand. in Technical Sciences (Eng.), Leading Researcher "Scientific-Production Enterprise "LTU" LLC, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: sasha.listratenko.12@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7643-5295.

Yuriy Shepetov – Cand. in Technical Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Space Technology and Non-Traditional Energy Sources, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.shepetov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3045-9106.

Oleksandr Kravchenko – Head of Department, "Scientific-Production Enterprise "LTU" LLC, Kharkiv, Ukraine; National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kravchenkoaleksandr671@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7145-4304.

Illia Borshchov – Researcher "Scientific-Production Enterprise "LTU" LLC; Assistant of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: illia.borshchov1@nure.ua, ORCID: 0000-0002-6598-6988.

Bohdan Podliesnyi – Researcher "Scientific-Production Enterprise "LTU" LLC; PhD Student of the Department of Space Technology and Non-Traditional Energy Sources, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: b.i.podliesnyi@khai.edu.