

*В.М. БОРЦОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛІСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,  
М.А. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, І.Т. ТИМЧУК, канд. техн. наук, О.В. КРАВЧЕНКО,  
О.В. СУДДЯ, І.В. БОРЦОВ, М.І.СЛІПЧЕНКО, д-р фіз.-мат. наук*

## СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОЛІМІДНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

### Вступ

Прогнозування ефективної теплопровідності наповнених полімерних систем вимагає знання не тільки теплових властивостей складових компонентів, але й ряд інших факторів. Першочергове значення має при цьому вивчення структурних змін, які відбуваються у композиті. Дуже важливим з цієї точки зору є розробка моделі наповненого полімеру, а також моделювання граничних шарів, які дуже впливають на властивості наповненої полімерної композитної системи. Необхідно враховувати, що механізми впливу матриці та наповнювача на теплопровідність різні за різних концентрацій. Управління властивостями полімерних композитних матеріалів має забезпечуватися не тільки збільшенням концентрації, а також збільшенням модифікуючої дії наповнювача (за рахунок дисперсності та інших факторів).

Для розробки нових теплопровідних поліімідних (ПІ) композитних плівок слід вибирати такі сполучні та наповнювачі, які забезпечують оптимальні значення теплофізичних, фізико-механічних та діелектричних характеристик поліімідних матеріалів [1].

При використанні поліімідних композитних матеріалів у системах електричної ізоляції та комутуючих елементів електронних вузлів актуальним є завдання покращення теплопередачі з одночасним збереженням високих діелектричних характеристик теплопровідних поліімідних шарів.

Полімерна матриця (у тому числі поліімідна), як правило, має знижені теплопровідні та високі діелектричні властивості. Щоб покращити теплопередачу, можна вводити в поліімідну матрицю діелектричні наповнювачі мікронних і менших розмірів, у тому числі і нанорозмірів, що мають високі теплофізичні характеристики. При такому підході не можна виключити зниження електроізоляційних властивостей композитних поліімідних плівок, характер зміни яких визначається електрофізичними властивостями частинок та їх концентрацій у композиті. Можливості підвищення ефективності теплопередачі у такому матеріалі будуть визначатися правильно підібраними властивостями, розмірами та концентрацією частинок наповнювача в поліімідній матриці.

Оскільки поліімідний композит є двокомпонентною системою, для розрахунку теплопровідності доцільно використовувати аналітичні моделі для вирішення теплофізичних задач. Це дозволяє для наближених розрахунків ефективної теплопровідності двокомпонентних сумішей для широкого діапазону вмісту порошкових наповнювачів у композитах використовувати прості моделі, наприклад формулу Бургера [2, 3]:

$$\lambda_{ef} = \frac{V_{cv}\lambda_{cv} + CV_n\lambda_n}{V_{cv} + CV_n},$$

де  $V_n$  – об'ємна частка наповнювача;  $V_{cv}$  – об'ємна частка сполучного;  $\lambda_n$ ,  $\lambda_{cv}$  і  $\lambda_{ef}$  – теплопровідності наповнювача, сполучного та ефективна теплопровідність суміші відповідно;  $C$  – розрахунковий коефіцієнт. Під визначенням «сполучна» розуміється безперервна фаза, а під «наповнювачем» – уривчаста.

Безрозмірний коефіцієнт  $C$  залежить, по-перше, від характеристик розподілу фаз у суміші:  $C = 1$  – гомогенна суміш,  $C \ll 1$  – ізольована фаза наповнювача,  $C > 1$  – безперервна фаза наповнювача. По-друге, від відношення  $\lambda_n / \lambda_{cv}$  (чим більше це відношення, тим менший коефіцієнт  $C$ ).

Наявність коефіцієнта  $C$  у формулі Бургера робить її зручною для опису теплопровідності двокомпонентних композитних матеріалів. Величина цього коефіцієнта враховує такі характеристики матеріалу, як безперервність/уривчастість фаз кожного з компонентів, форму і розмір частинок наповнювача і відношення їх коефіцієнтів теплопровідності. Саме в цьому полягає його фізичне значення. Недоліком цієї формули є необхідність підбору значення коефіцієнта  $C$  для кожного конкретного типу композитного матеріалу, що знижує її універсальність і впливає на точність розрахунків.

У роботах [2, 3] зроблено висновок про суттєвий вплив твердої фази на теплопровідність композитів та підтверджується факт узгодження експериментальних даних з розрахунками за формулою Бургера при значенні коефіцієнта  $C > 1$ . Оскільки коефіцієнт  $C$  розташований при доданку, який враховує теплопровідність твердих частинок, то великі значення коефіцієнту  $C$  відповідають збільшенню вкладу твердої фази в теплопровідність суміші, а менші – його зниженню.

Розрахунки, виконані за формулою Бургера для різних наповнювачів і сполучного, відповідають передбачуваній залежності коефіцієнта  $C$  від відношення  $\lambda_n / \lambda_{cv}$  в широкому діапазоні значень ефективної теплопровідності композитів  $\lambda_{ef}$  і об'ємного вмісту наповнювача  $V_n$ .

Однак на практиці теплопровідність композиту при одній і тій же концентрації наповнювача може змінюватись у великих межах. Це пов'язано з особливостями розподілу наповнювача у матриці. Особливо ця залежність проявляється при великій різниці коефіцієнтів теплопровідності матриці та наповнювача. Тому для підтвердження застосування розроблених структурних моделей та програм розрахунку теплопровідності за формулою Бургера необхідно виготовити та дослідити ефективну теплопровідність невинуватено великої кількості експериментальних зразків різних типів нових високонаповнених поліімідних композитних плівок. Визначити величину відхилень експериментально одержаних значень коефіцієнта теплопровідності композитного матеріалу від теоретично розрахованих за моделлю. Здійснити розрахунок та провести корекцію значень коефіцієнтів  $C$  за експериментальними даними. Для проведення таких досліджень потрібні значні кошти, матеріальні та трудові витрати, оскільки серед полімерних композитних матеріалів поліімідні матеріали відрізняються відносно високою ціною. При цьому ціна високодисперсних порошоків наповнювачів поліімідних композитних плівок може бути вищою, ніж у крупнодисперсних у кілька разів, а ціна нанопорошків вище ціни крупнодисперсних (десятки мкм) порошоків майже на два порядки. Таким чином, якщо кількість наповнювача в композиті складатиме понад 50 мас. %, то вартість нового композитного матеріалу, що розробляється, значною мірою визначатиметься вартістю наповнювачів. Загальна ж вартість матеріалу при цьому може різко зрости, тим самим зводячи нанівець одну з головних можливих переваг нових композитних матеріалів, що розробляються, перед їх аналогами – нижчу вартість. Крім того, в тих випадках, коли потрібно виконання розрахунку з можливістю зміни концентрацій частинок наповнювача в широкому діапазоні або варіювання форми та розміри частинок (одиниці мікрон, ультрамікронні або наночастинки), аналітичні моделі не можуть забезпечити достатню достовірність результатів.

У цій ситуації найбільш доцільним і надійним методом (крім експериментального) визначення ефективної теплопровідності нових поліімідних матеріалів є метод прямого моделювання, тобто чисельний метод розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності поліімідного композитного матеріалу з урахуванням граничних і початкових умов [4]. Суть методу полягає у безпосередньому вирішенні рівняння теплопровідності з урахуванням граничних та початкових умов кінцево-різницевиими методами. Використання чисельних методів для знаходження ефективної теплопровідності композиційної системи дозволяє проводити більш точні розрахунки для різних розподілів наповнювача в матриці, що дозволяє врахувати вплив структури на теплові властивості композиту, а також наявність граничного шару.

Метою роботи було дослідження надійного, відносного простого та автоматизованого теоретичного методу визначення ефективної теплопровідності нових поліімідних теплопро-

відних композитних плівок за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS®.

У зв'язку з цим було проведено чисельне моделювання теплопровідності композитних матеріалів при введенні в поліімідну матрицю високотеплопровідних частинок різних порошкових наповнювачів з урахуванням граничних та початкових умов. При цьому варіювалася об'ємна концентрація сумішей наповнювачів у них. Було проаналізовано вплив теплопровідності частинок наповнювача та їх розмірів на ефективну теплопровідність композитних поліімідних матеріалів.

Запропоновано конкретні рекомендації підвищення ефективної теплопровідності від 0,12 до 1 – 4 Вт/(м·К) поліімідних композитних плівок шляхом зміни розмірів, концентрації, теплопровідності частинок наповнювача, типів матеріалів порошків наповнювача з урахуванням особливостей розподілу сумішей наповнювачів у поліімідній матриці.

### Численний метод розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності поліімідного композитного матеріалу з урахуванням граничних і початкових умов

Застосування методу прямого моделювання теплопровідності середовищ зі складною структурою дозволяє проводити розрахунки ефективної теплопровідності для різних розподілів частинок порошків наповнювачів у поліімідних сполучних. При цьому є можливість зміни концентрації частинок наповнювачів у матриці у широкому діапазоні або варіювання розміру частинок, що дозволяє врахувати вплив структури та граничних шарів на теплові властивості композитів.

У цьому випадку композитна система (поліімідний композитний матеріал), теплопровідність якої необхідно розрахувати, моделюється у вигляді куба, розбитого на комірки [4 – 7].

На рис. 1 зображено модельне уявлення композитної системи у вигляді куба, розбитого на елементарні комірки.

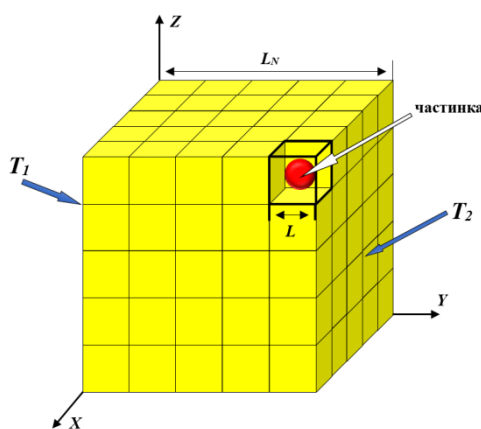


Рис. 1. Модель композитної системи у вигляді куба, розбитого на елементарні комірки

На протилежних бокових гранях куба композитної системи з довжиною ребра  $L_N$  задаються різні температури  $T_1$  та  $T_2$ . В результаті вздовж одного із напрямків створюється температурний градієнт. Тепловий потік через інші грані куба відсутній.

При моделюванні розглядався рівномірний розподіл частинок. Об'єм матриці композиту можна уявити у вигляді декількох елементарних комірок, у кожній з яких поміщена одна або кілька частинок наповнювача необхідної форми (рис. 2). На рис. 2, а зображено елементарну кубічну комірку с довжиною ребра  $L$ , яка заповнена однією сферичною частинкою мікронного розміру наповнювача з діаметром  $\varnothing = L$ . При цьому максимальна об'ємна концентрація матеріалу сферичної частинки наповнювача в такій елементарній кубічній комірці композитної системи становить не більше 52,4 об. %.

На рис. 2, б зображена елементарна кубічна комірка з довжиною ребра  $L$ , заповнена однією сферичною частинкою з діаметром  $\varnothing = L$  і додатковими кількома елементарними кубічними комірками з довжиною ребра  $l$ , які заповнені однією сферичною часткою субмікронного розміру з діаметром  $\varnothing = l$ .

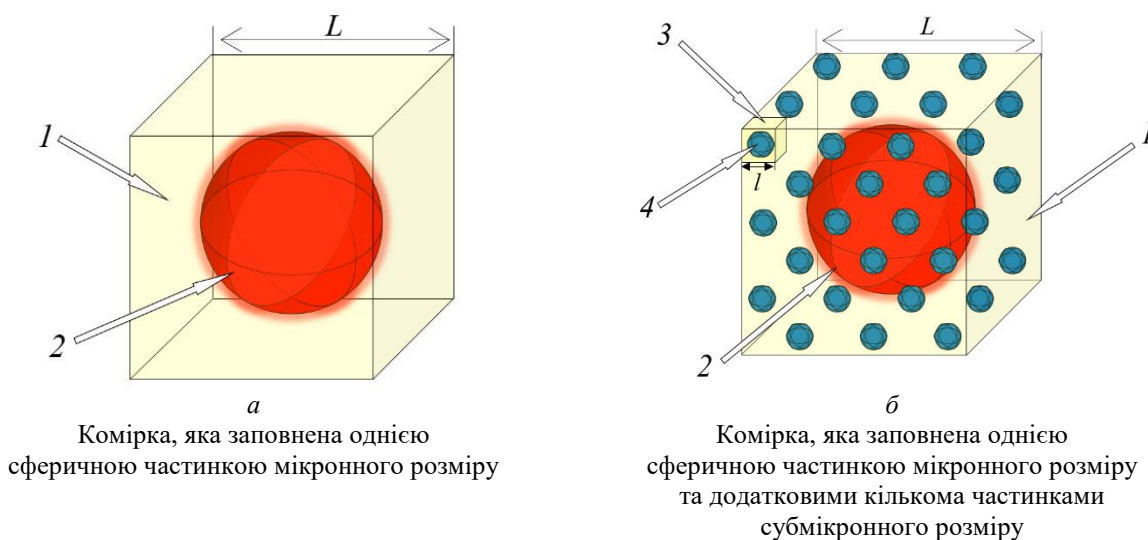


Рис. 2. Модельне уявлення рівномірного розподілу частинок наповнювачів:

1,3 – елементарні комірки матриці композитної поліімідної плівки; 2 – наповнювач у формі сферичної частинки мікронного розміру; 4 – наповнювач у формі сферичної частинки субмікронного розміру

Для спрощення розрахункової моделі було прийнято ряд основних допущень:

- задачі розглядаються як стаціонарні, оскільки вирівнювання температури в теплопровідному об'ємі відбувається значно швидше, ніж зміна зовнішніх умов;
- матеріали, складові композита, вважаються ізотропними. При цьому їх теплопровідність не залежить від температури;
- розміри частинок кожного типу наповнювача вважаються однаковими. Поодинокі елементарні кубічні комірки з довжиною ребра  $L$  і  $l$  заповнені однією частинкою наповнювача сферичної форми мікронного або субмікронного розміру відповідно. Елементарні кубічні комірки рівномірно розподілені у всьому об'ємі композитної системи. Фракційний склад частинок не враховується;
- тепловий контакт між частинками та полімером приймається ідеальним (дане припущення тягне за собою зростання теплопровідності композиту внаслідок нульового теплового опору на межі середовищ полімер – частинка);
- наявність мікрodefektів не враховується.

Параметризація чисельної моделі дозволяє варіювати властивості композитної системи; в даному випадку це розміри частинок, властивості їх матеріалів та властивості поліімідної матриці. Відповідно до моделі зв'язок між довжиною  $L$  ребра куба елементарної комірки (вона визначає розмір розрахункової області та розмір частинки) та об'єм частинки  $V_f$  задаються формулою

$$L = \left( \frac{V_f}{N_v} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

де  $N_v$  – об'ємна концентрація частинок.

Ефективна теплопровідність поліімідного композитного матеріалу

$$\lambda_{eff} = q_m \frac{L}{|T_1 - T_2|}, \quad (2)$$

де  $\lambda_{eff}$  – ефективна теплопровідність композитного матеріалу;  $q_m$  – середній тепловий потік;  $L$  – довжина ребра куба;  $T_1 - T_2$  – різниця температур протилежних граней.

З метою визначення величини  $q_m$  виконується чисельне рішення тривимірної стаціонарної задачі теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

Коефіцієнт теплопровідності у цьому рівнянні залежить від координат:  $\lambda = \lambda(x, y, z)$ .

На двох поверхнях куба задаються граничні умови першого роду, на інших чотирьох накладаються умови теплоізоляції [7]. Сучасні обчислювальні засоби дозволяють проводити пряме моделювання теплопровідності середовищ зі складною структурою. При цьому автори використали для автоматизації розрахунку середнього теплового потоку  $q_m$  програмний комплекс COMSOL MULTIPHYSICS.

### **Результати розробки теоретичних моделей поліімідних композитних плівок на основі поліімідних лаків і теплопровідних порошків наповнювачів**

Відповідно до класифікації дисперсні наповнювачі за розміром частинок  $d$  поділяються на крупнодисперсні ( $d$  більше 40 мкм), середньодисперсні ( $d$  від 10 до 40 мкм), високодисперсні ( $d$  від 1 до 10 мкм) та ультрадисперсні ( $d$  менше 1 мкм). До цієї класифікації належить група нанодисперсних порошків ( $d$  менше 0,1 мкм).

У розрахунках використовувалися наповнювачі, що належать до групи високодисперсних та ультрадисперсних порошків. Вибір таких розмірів частинок наповнювачів обумовлений прагненням отримати на практиці необхідні значення електрофізичних і механічних характеристик поліімідних композитів при мінімальній вартості матеріалів, оскільки вартість компонентів може істотно впливати на підсумкову вартість композитів.

При аналізі характеру теплоперенесення у дисперсно-наповнених композитах слід враховувати, що теплоперенесення через великі частинки мікронного розміру відбувається легше, ніж через дрібні частинки. Це пов'язано з меншою протяжністю меж між великими частинками.

З іншого боку, дрібні частинки при ідентичних ступенях наповнення розташовані ближче один до одного в композиті, що означає формування більш тонкого міжфазного полімерного шару. Це дозволяє зменшити граничний тепловий опір наповнювач-матриця і, як результат, теплопередача через сітку частинок наповнювача стає більш ефективною.

При високій концентрації теплопровідних частинок механічні властивості композиту різко погіршуються, і матеріал стає жорстким і крихким. Тому створення поліімідного композиту, що поєднує в собі хороші механічні та теплопровідні властивості, є досить непростю задачею. Основна ідея ефективного управління теплофізичними характеристиками композитного матеріалу при високих ступенях наповнення полягає у максимізації теплопровідних шляхів поряд з мінімізацією граничного теплового опору наповнювач-наповнювач і наповнювач-матриця.

Таким чином, для розробки структурних моделей варіантів високонаповнених теплопровідних електроізоляційних композитних поліімідних матеріалів були обрані порошки наповнювачів  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  і  $AlN$  з дрібнодисперсними і ультрадисперсними розмірами частинок. В якості поліімідного сполучного був обраний поліімідний термореактивний лак типу Pyre ML RC 5069, який є базовим матеріалом для виготовлення поліімідних плівок типу DuPont™ Kapton® HN, що мають високу термічну стабільність, але низьку теплопровідність (0,12 Вт/(м·К)).

Такий вибір обумовлений необхідністю підтримки допустимих електрофізичних і механічних властивостей при розробці нових теплопровідних поліімідних композитних матеріалів.

В даний час теплопровідні електроізолюючі поліімідні плівки, що промислово випускаються, мають типову теплопровідність від 0,36 до 0,8 Вт/(м·К) при товщинах від 25 до 75 мкм (1 – 3 mil, 1 mil ~ 25 мкм) і при цьому вони зберігають високу напругу електричного пробоя, механічну стійкість та гнучкість [8, 9].

Тому для побудови структурних моделей та оцінки теплопровідності нових типів поліімідних композитних матеріалів з очікуваною теплопровідністю до 1,0 Вт/(м·К) і більше товщина поліімідної плівки вибиралася не менше 25 мкм. Частинки порошків теплопровідних наповнювачів, що мають форму кулі, мали діаметри, кратні товщині композиту та становлять для дрібнодисперсних порошків 8 мкм, а для ультрадисперсних порошків – 0,8 і 0,4 мкм.

Такий підхід дозволяє уявити модель ділянки композитної системи у вигляді куба з довжиною ребра  $L_N = 40$  мкм, що має структуру кубічних ґрат 5 x 5 x 5 з елементарними кубічними комірками з довжиною ребра  $L = 8$  мкм, які рівномірно заповнені частинками. При цьому загальна кількість елементарних комірок у кубічних ґратах такої ділянки композиту становить 125 комірок (рис. 3).

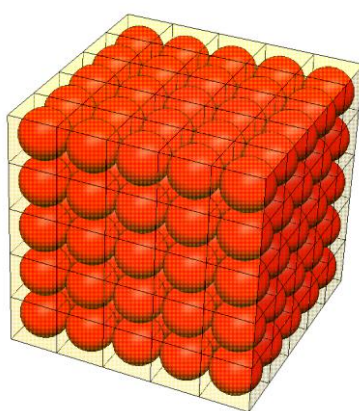


Рис. 3. Модель кубічних ґрат ділянки композитної системи

У табл. 1 представлено вихідні дані для розгляду різних варіантів структурних моделей поліімідних теплопровідних композитних плівок.

Температурний градієнт ( $T_1 - T_2$ ) протилежних граней кубічних ґрат композитів задавався при припущенні, що температура  $T_2$  відповідає температурі навколишнього середовища  $T_a = 25$  °С. Температура  $T_1$  відповідає рекомендованій максимальній робочій температурі області  $p$ - $n$ -переходу напівпровідникових джерел тепла і становить  $T_j = 80$  °С при стабільному стані теплового розподілу на кожній досліджуваній ділянці композитної системи.

Таблиця 1

Структурні моделі поліімідних теплопровідних композитних плівок з різною об'ємною концентрацією наповнювачів у композитній системі

Типи порошків наповнювачів	$\lambda_n$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{св}$ , Вт/(м·К)	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	Об'ємна концентрація частинок $N_v$ , об. %		
					Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
					8 мкм	8 мкм + 0.8 мкм	8 мкм + 0.4 мкм
SiO <sub>2</sub>	7	0,12	80	25	0 – 52,4	0 – 69,5	0 – 73,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	0,12					
SiC	25	0,12					
AlN	55	0,12					

На рис. 4 представлено варіанти досліджуваної структурної 3D-моделі елементарних комірок поліімідних композитних плівок.

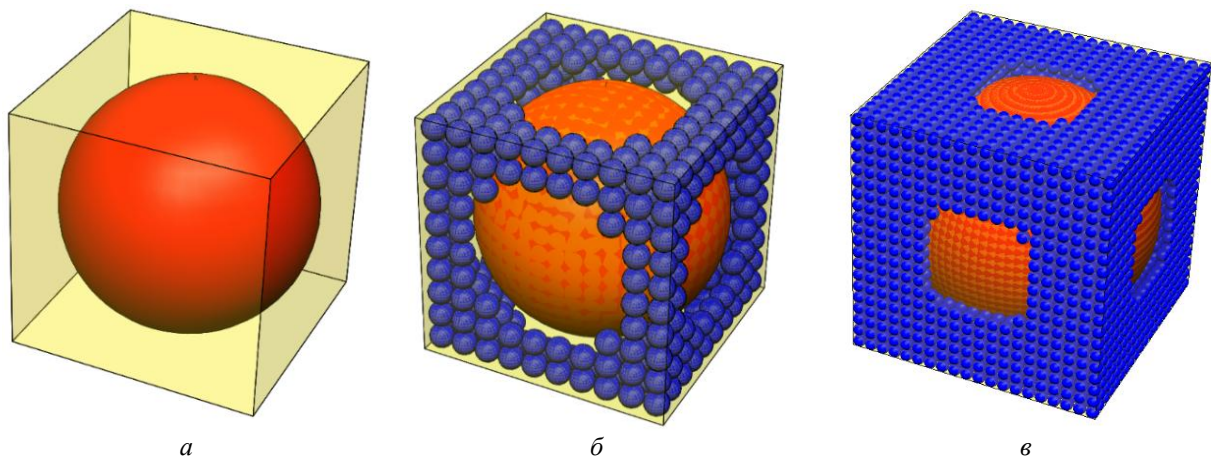


Рис. 4. Досліджувана структурна 3D модель комірок поліімідних композитних плівок:  
*a* – варіант 1; *б* – варіант 2; *в* – варіант 3

Для варіанта 1 одна елементарна комірка кубічної ґратки з довжиною ребра 8 мкм має об'єм рівний  $512 \text{ мкм}^3$ , а одна сферична частка діаметром 8 мкм в комірниці має об'єм рівний  $268 \text{ мкм}^3$  (рис. 4, *a*). При цьому максимальна об'ємна концентрація матеріалу частинки наповнювача у такій елементарній комірниці композитної системи складе не більше 52,4 об. %.

Для досягнення об'ємної концентрації частинок наповнювача більш ніж 52,4 об. % у структурну 3D-модель елементарної комірки були додані додаткові ультрадисперсні частинки. Таким чином, для варіанта 2 одна елементарна комірка кубічної ґратки з довжиною ребра 8 мкм має об'єм рівний  $512 \text{ мкм}^3$ , одна сферична частка діаметром 8 мкм в комірниці має об'єм  $268 \text{ мкм}^3$ . Додані сферичні частинки діаметром 0,8 мкм (328 шт.) у комірниці мають об'єм рівний  $88 \text{ мкм}^3$  (рис. 4, *б*). При цьому максимальна об'ємна концентрація матеріалу частинок наповнювача в такому комбінованому варіанті елементарної комірки композитної системи становитиме 69,5 об. %.

Для варіанта 3 одна елементарна комірка кубічної ґратки з довжиною ребра 8 мкм має об'єм  $512 \text{ мкм}^3$ , одна сферична частка діаметром 8 мкм в комірниці має об'єм  $268 \text{ мкм}^3$ . Додані сферичні частинки діаметром 0,4 мкм (3224 шт.) у комірниці мають об'єм  $108 \text{ мкм}^3$  (рис. 4, *в*). При цьому максимальна об'ємна концентрація матеріалу частинок наповнювача в такому комбінованому варіанті елементарної комірки композитної системи становитиме 73,5 об. %.

За допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS® та формули (2) були виконані 3D-структурне моделювання комірок поліімідних композитних плівок і розрахунки середніх теплових потоків та ефективних коефіцієнтів теплопровідності поліімідних композитних плівок для варіантів 1, 2, 3.

На рис. 5 показано результати розрахунку ефективної теплопровідності поліімідних композитних плівок для різних наповнювачів та об'ємної концентрації частинок наповнювачів.

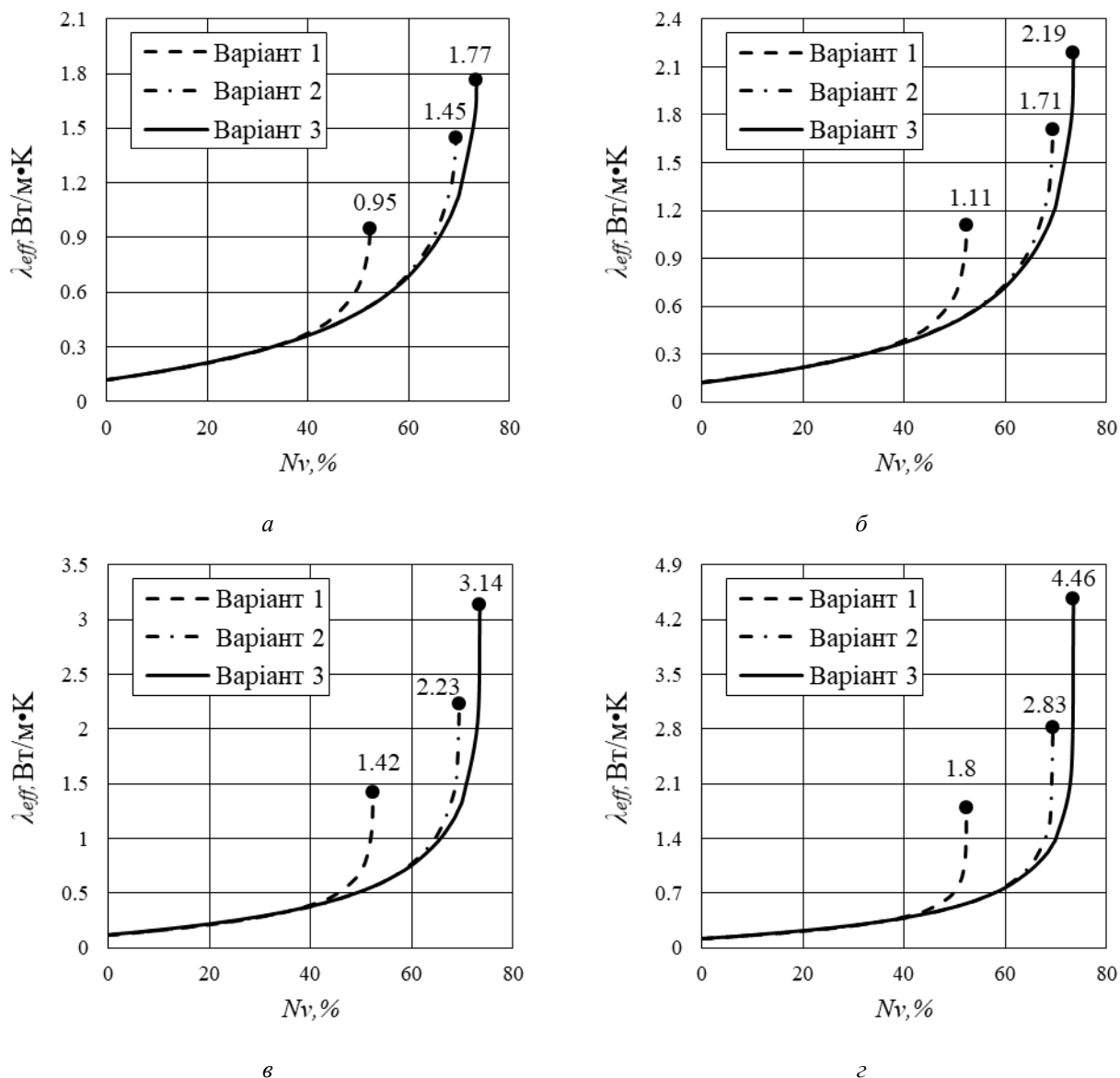


Рис. 5. Розрахункові значення ефективної теплопровідності поліімідних композитних систем для різних порошкових наповнювачів залежно від об'ємної концентрації частинок наповнювачів: а –  $\text{SiO}_2$ ; б –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; в –  $\text{SiC}$ ; г –  $\text{AlN}$

Варіювання кількістю наповнювача у поліімідній матриці дозволило встановити, що більш високі теплопровідні властивості досягаються при вмісті частинок наповнювача в поліімідному композиті не менше 52,4 об. % та зростають при подальшому збільшенні вмісту наповнювача.

Максимальна ефективна теплопровідність спостерігалася для варіантів композитних матеріалів, в яких у якості наповнювача використовується суміш мікронних і ультрамікронних частинок порошків наповнювачів з переважним вмістом мікрочастинок.

При загальному об'ємі концентрації наповнювачів від 52,4 до 69,5 об. % у композитах при складі сумішей порошків близько 75 % із середніми розмірами частинок до 8 мкм та 25 % із середніми розмірами частинок до 0,8 мкм підтверджена чисельними розрахунками очікувана максимальна ефективна теплопровідність поліімідних плівок в діапазоні значень від 0,95 до 2,83 Вт/(м·К) для досліджених порошків наповнювачів із  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{AlN}$ .

При загальному об'ємі концентрації наповнювачів від 52,4 до 73,5 об. % у композитах при складі сумішей порошків близько 71 % із середніми розмірами частинок до 8 мкм та 29 % із середніми розмірами частинок до 0,4 мкм підтверджена чисельними розрахунками



очікувана максимальна ефективна теплопровідність поліімідних плівок в діапазоні значень від 0,95 до 4,46 Вт/(м•К) для досліджених порошків наповнювачів із  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  та  $AlN$ .

При цьому комбінована поліімідна композитна система із застосуванням суміші високотеплопровідних високодисперсних (8 мкм) та ультрадисперсних (0,4 мкм) порошкових наповнювачів з  $AlN$  показала кращі оціночні результати максимальної ефективної теплопровідності ( $\lambda_{eff} = 4,46$  Вт/(м•К), варіант 3).

## Висновки

Авторами розроблено структурні моделі та проведено чисельне моделювання теплопровідності композитних матеріалів при введенні в поліімідну матрицю високотеплопровідних частинок порошкових наповнювачів із  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ , з урахуванням граничних та початкових умов за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS.

В результаті чисельного моделювання було вирішено такі задачі:

- вивчено вплив теплопровідності частинок  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ , які включені у матрицю полііміду, на ефективну теплопровідність композитів;

- вивчено вплив об'ємної концентрації сферичних частинок з мікронними розмірами наповнювачів  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $AlN$  на ефективну теплопровідність поліімідних композитних матеріалів;

- встановлено суттєвий вплив об'ємної концентрації сумішей сферичних частинок з мікронними та ультрамікронними розмірами наповнювачів  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ , на ефективну теплопровідність поліімідних композитних матеріалів.

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновки, що:

- ефективна теплопровідність поліімідних композитів визначається величинами теплопровідності як поліімідної матриці, так і наповнювача;

- максимальна ефективна теплопровідність спостерігалася для варіантів моделей композитних матеріалів, в яких в якості наповнювача використовуються суміші мікронних і ультрамікронних частинок порошків наповнювачів з переважним вмістом мікронних частинок;

- при загальній об'ємній концентрації наповнювачів від 52,4 до 69,5 об. % у композитах при складі сумішей порошків близько 75 % із середніми розмірами частинок до 8 мкм та 25 % із середніми розмірами частинок до 0,8 мкм розрахунками підтверджена очікувана максимальна ефективна теплопровідність композитних поліімідних плівок у діапазоні значень від 0,95 до 2,83 Вт/(м•К) для досліджених порошків наповнювачів із  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  та  $AlN$ .

- при загальній об'ємній концентрації наповнювачів від 52,4 до 73,5 об. % у композитах при складі сумішей порошків близько 71 % із середніми розмірами частинок до 8 мкм та 29 % із середніми розмірами частинок до 0,4 мкм розрахунками підтверджена очікувана максимальна ефективна теплопровідність композитних поліімідних плівок у діапазоні значень від 0,95 до 4,46 Вт/(м•К) для досліджених порошків наповнювачів із  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  та  $AlN$ .

Таким чином, за результатами роботи запропоновано конкретні рекомендації щодо проведення прямого моделювання теплопровідності полімерних середовищ зі складною структурою та чисельних розрахунків з достатньою достовірністю ефективної теплопровідності поліімідних композитних плівок, що розробляються, з метою збільшення їх теплопровідності від 0,12 до 1 – 4 Вт/(м•К) шляхом варіювання концентрації та теплопровідності сумішей частинок порошкових наповнювачів мікронних та ультрамікронних розмірів. Комбінована поліімідна композитна система із застосуванням суміші високотеплопровідних високодисперсних (8 мкм) та ультрадисперсних (0,4 мкм) порошкових наповнювачів з  $AlN$  показала кращі оціночні результати максимальної ефективної теплопровідності –  $\lambda_{eff} = 4,46$  Вт/(м•К).

### Список літератури:

1. New approaches to creating promising heat-conductive electrical insulating polyimide nanocomposite materials / Borshchov V.M., Listratenko O.M., Protsenko M.A., Tymchuk I.T., Kravchenko O.V., Syddia O.V., Slipchenko M.I., Chichkov B.M. // *Functional Materials*. 2022. Vol.29, No.1.P. 20 – 29
2. Міхєєв В.А. Забезпечення якості нових функціональних матеріалів для теплопровідних покриттів на стадії розробки та виробництва : дис. ... канд. техн. наук. 2018. 173 с. (рос. мовою).
3. Сулаберідзе В.Ш., Скорнякова Є.А. Оцінка параметрів розрахункових моделей теплопровідності композиційних матеріалів з полімерним сполучним за експериментальними даними // *Вісник Магнітогор. держ. техн. ун-ту ім. Г.І. Носова*. 2020. Т.18. №4. С. 57 – 64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>. (Рос. мовою).
4. Нікітін А. В. Чисельний метод розрахунку коефіцієнта теплопровідності наповнених полімерів / А. В. Нікітін, А. Ю. Бачуріна // *Вісник Гродн. держ. ун-ту імені Янки Купали. Сер. 2. Математика. фізика. інформатика, обчислювальна техніка та управління*. 2011. С. 106 – 111. (Рос. мовою).
5. Нікітін Д.А. Моделювання структури композиційних систем та розрахунок їх коефіцієнта теплопровідності // *Матеріали. Технології. Інструменти*. 2004. Т. 9, № 2. С. 11 – 15. (Рос. мовою).
6. Бачуріна А.Ю., Нікітін А.В. Чисельний метод розрахунку коефіцієнта теплопровідності композиційної системи // *Вісник Гродн. держ. ун-ту. Сер. 2. Математика. фізика. Інформатика, обчислювальна техніка та управління. Біологія* 2010. №2. С.93 – 99. (Рос. мовою).
7. Степанов В.В. Петреня Ю.К., Андрєєв А.М., Костельов А. М., Маннанов Е.Р., Талалов В.А. Вплив властивостей компонентів на ефективну теплопровідність полімерних композитних матеріалів // *Наук.-техн. відомості СПбГПУ. Фіз.-мат. науки*. 2018. Т. 11. № 4. С. 85 – 94. DOI: 10.18721/JPM.11408. (Рос. мовою).
8. Теплопровідна поліімідна плівка DuPont™ Kapton® MT, <https://www.dupont.com/products/kapton-mt.html> // офіційний сайт (дата звернення 03.10.2022).
9. Теплопровідна поліімідна плівка DuPont™ Kapton® MT +, <https://www.dupont.com/products/kapton-mt-plus.html>. // офіційний сайт (дата звернення 03.10.2022).

Надійшла до редколегії 07.10.2022

### Відомості про авторів:

**Борщов Вячеслав Миколайович** – д-р техн. наук, професор, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», перший заступник директора – головний конструктор; Україна; e-mail: [viatcheslav.borshchov@cern.ch](mailto:viatcheslav.borshchov@cern.ch); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-8932>

**Лістратенко Олександр Михайлович** – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: [sasha.listratenko.12@gmail.com](mailto:sasha.listratenko.12@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-5295>

**Проценко Максим Анатолійович** – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділення – заступник головного конструктора; Україна; e-mail: [max.protsenko.1978@gmail.com](mailto:max.protsenko.1978@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-1701>

**Тимчук Ігор Трохимович** – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», головний технолог; Україна; e-mail: [ihortymchuk78@gmail.com](mailto:ihortymchuk78@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-7253>

**Кравченко Олександр Вікторович** – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», заступник начальника відділу; Україна; e-mail: [kravcenkoaleksandr671@gmail.com](mailto:kravcenkoaleksandr671@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7145-4304>

**Суддя Олександр Валерійович** – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», науковий співробітник; Україна; e-mail: [4e11195@gmail.com](mailto:4e11195@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-979X>

**Борщов Ілля Вячеславович** – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», інженер; Україна, e-mail: [illia.borshchov1@nure.ua](mailto:illia.borshchov1@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6598-6988>

**Сліпченко Микола Іванович** – д-р фіз.-мат. наук, професор, Інститут скінтіляційних матеріалів НАНУ, провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: [naukovets.big@gmail.com](mailto:naukovets.big@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4242-4800>