

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор,
чл.-кор. НАН України, завідувач відділу
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of the Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Дінжос Роман Володимирович

*доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи
Чорноморський національний університет імені Петра Могили*

Dinzhos Roman

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Vice-rector for scientific work Petro Mohyla Black Sea National University*

Меранова Наталія Олегівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Meranova Nataliia

*Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher,
Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Прокопов Віктор Григорович

*доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Prokopov Viktor

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Ольховська Ніна Миколаївна

*науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Olkhovska Nina

*Junior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Хміль Дмитро Петрович

*доктор філософії, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Khmil Dmytro

*PhD, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Місюра Тимофій Олексійович

*доктор філософії, науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Misiura Tymofii

*PhD, Scientific Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Дармосюк Валентина Миколаївна

*кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри вищої та прикладної математики,
Миколаївський національний аграрний університет*

Darmosyuk Valentyna

PhD, Associate Professor of the

Department of Higher and Applied Mathematics,

Mykolaiv National Agrarian University

**ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ
ПОЛІАМІДУ 6 ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ НАПОВНЮВАЧІВ
SPECIFIC HEAT CAPACITY OF COMPOSITES BASED ON
POLYAMIDE- 6 USING VARIOUS FILLERS**

Анотація. Для полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліаміду 6, наповнених вуглецевими нанотрубками, мікрочастинками алюмінію та міді проведено аналіз залежності питомої теплоємності від методу одержання композиту та температури.

Ключові слова: Мікро- і нанокомпозити, теплоємність, поліамід-6, вуглецеві нанотрубки, мікрочастинки міді, мікрочастинки алюмінію.

Summary. For polymer micro- and nanocomposites based on polyamide 6, filled with carbon nanotubes, aluminum and copper microparticles, an analysis of the dependence of the specific heat capacity on the method of obtaining the composite and temperature was carried out.

Keywords: Micro- and nanocomposites, heat capacity, polyamide-6, carbon nanotubes, copper microparticles, aluminum microparticles.

Надійна експлуатація сучасного теплоенергетичного обладнання, довговічність окремих його елементів вимагає розробки нових матеріалів для їх виготовлення. До таких матеріалів належать полімерні мікро- і нанокомпозити. Ці матеріали характеризуються унікальним спектром фізико-механічних і технологічних властивостей. При цьому важливими

напрямами використання даних матеріалів є застосування їх високо- і низькотеплопровідних модифікацій [1-14].

Високотеплопровідні нанокompозити можуть використовуватись для виготовлення теплообмінних поверхонь різного призначення, а також для обладнання, що експлуатується в умовах впливу агресивних середовищ [15-17]. Низькотеплопровідні нанокompозити можуть бути застосовані для створення трубопроводів енергетичних систем, теплозахисних шарів різного устаткування [16-18]. Можливість використання полімерних нанокompозитів в енергетичних системах вимагає детального дослідження їх теплофізичних властивостей. Як показали дослідження [9-15], механічні і теплофізичні властивості нанокompозитів залежать від багатьох факторів, таких як основа композиту, методи їх отримання, вид і частка наповнювачів тощо. В роботі [10] досліджено теплофізичні властивості нанокompозитів на основі поліпропіленової матриці, а в роботі [11] на основі полікарбонату. Влив інших факторів, таких як тривалість змішування компонентів нанокompозиту, температурний режим тощо на їх теплофізичні властивості досліджено в роботах [13-21]. Одним із важливих факторів впливу на теплофізичні властивості нанокompозитів є метод їх одержання. В залежності від методу одержання полімерних композитів, останні можуть набувати властивостей високотеплопровідних чи низькотеплопровідних модифікацій. Це визначає актуальність дослідження впливу різних методів синтезу полімерних мікро- і нанокompозитів на їхні теплофізичні характеристики. Однією з таких теплофізичних характеристик є питома теплоємність. Зміна питомої теплоємності нанокompозиту на основі поліаміду 6 при його наповненні вуглецевими нанотрубками (ВНТ) або мікрочастинками алюмінію чи міді представлено в роботі [16]. Результати цих експериментальних досліджень свідчать про екстремальний характер залежності теплоємності від температури композиту. Показано зміну теплоємності з ростом масової частки наповнювача. Теплофізичні

властивості нанокompозитів, зокрема і питома теплоємність, потребують всебічного і більш детального дослідження. В даній статті наведено результати досліджень питомої теплоємності нанокompозитів на основі поліаміду 6, одержаних двома методами, при його наповненні ВНТ, мікрочастинками алюмінію та міді.

Мета роботи. Встановлення ефектів впливу на питому теплоємність полімерних мікро- і нанокompозитів з матрицею з поліаміду 6 різних методів їх одержання та типу наповнювача.

Представлено дані експериментальних досліджень питомої теплоємності полімерних мікро- і нанокompозитів на основі поліаміду 6 при його наповненні вуглецевими нанотрубками, мікрочастинками міді та алюмінію. В ході проведення досліджень масова частка наповнювача змінювалась від 0,3 до 10%, температура композитів – від 320 до 525 К. Для одержання мікро- і нанокompозитів застосовані методи, що базуються на змішуванні компонентів в сухому вигляді (метод 1) або в розплаві полімеру (метод 2). Питома теплоємність визначалась на основі методу диференціальної скануючої колориметрії на установці DSC-2 з модифікованим програмним забезпеченням.

Виконано порівняльний аналіз величини питомої теплоємності нанокompозитів з різними наповнювачами при двох методах їх синтезу, при зміні температури та частки наповнювачів. Дані цих порівнянь представлено в таблиці 1 та на рис. 1.

Таблиця 1

Температурна залежність теплоємності поліаміду 6 (матриця) та полімерних композитів на його основі, наповнених мікрочастинками алюмінію чи міді та вуглецевими нанотрубками, при їх отриманні методами сухого змішування (метод 1) і у розплаві полімеру (метод 2) для $\omega = 10\%$

Поліамід 6 (матриця)		Температура, К									
		350	400	450	460	470	480	485	490	495	497
		1,16	1,64	2,20	2,48	3,07	4,44	5,41	6,34	5,77	3,99
Наповнювач	Метод										
1. Алюміній	1	1,19	1,62	2,18	2,45	3,03	4,38	5,37	6,25	5,69	3,94
	2	1,11	1,59	2,09	2,30	2,72	3,67	4,49	5,44	6,21	6,16
2. Мідь	1	1,18	1,61	2,14	2,40	2,95	4,24	5,15	6,03	5,49	3,82
	2	1,12	1,49	1,88	2,05	2,37	3,11	3,76	4,50	5,10	5,06
3. Вуглецеві нанотрубки	1	1,18	1,59	2,10	2,35	2,89	4,13	5,01	5,85	5,34	2,39
	2	1,11	1,47	1,83	1,99	2,30	3,00	3,61	4,30	4,87	4,83

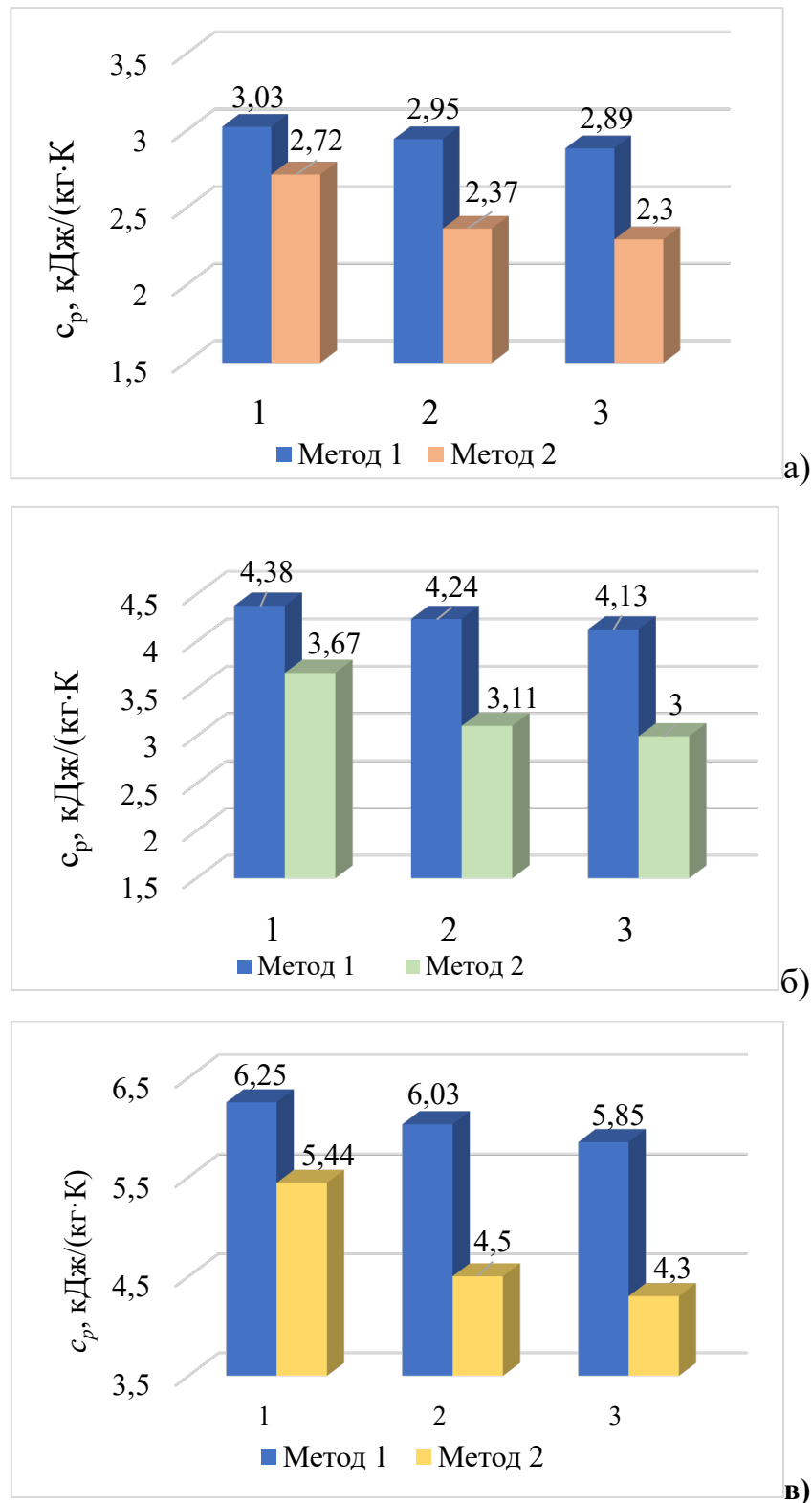


Рис. 1. Питома теплоємність полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліаміду 6 для різних методів їх одержання при $\omega = 10\%$, різних наповнювачах: 1 - мікрочастинки алюмінію; 2 - мікрочастинки міді; 3 - ВНТ і різних температурах: а) $T=470\text{ K}$; б) $T=480\text{ K}$; в) $T=490\text{ K}$.

Питома теплоємність досліджуваних полімерних композитів, одержаних методом 1, з різними наповнювачами, має більші значення ніж композити одержані методом 2. Такі співвідношення зберігаються до температури 490 К включно. Найбільші значення теплоємності в дослідженому інтервалі температур при фіксованій масовій долі наповнювача $\omega = 10\%$ зафіксовано при наповненні полімерної матриці алюмінієм, дещо нижчі міддю і найменші ВНТ.

Як видно з даних таблиці 1, питома теплоємність досліджуваних полімерних композитів для різних методів їх одержання відрізняється незначно в інтервалі температур 350-470К. При збільшенні температури різниця між значеннями теплоємності композиту одержаного першим і другим способом збільшується і досягає максимальних значень при температурі 490 К, яка близька до температури плавлення полімеру $T_{пл} = 492$ К (таблиця 1). При зміні виду наповнювача для двох методів одержання композитів різниця між значеннями теплоємності, при температурі 490К, найбільша для ВНТ -1,55 кДж/(кг·К), дещо менша для мікрочастинок міді-1,53 кДж/(кг·К), та найменша для мікрочастинок алюмінію -0,81кДж/(кг·К).

Дані щодо ефектів впливу методів одержання полімерних композиційних матеріалів на величину їх питомої теплоємності свідчать, що значення питомої теплоємності c_p досліджуваних полімерних композитів одержаних методом 1, для всіх видів наповнювачів, більші від значень c_p полімерних композитів одержаних методом 2. Розбіжності ж величини питомої теплоємності композитів, отриманих на основі різних методів, є помітними лише при температурах, близьких до температури плавлення полімеру.

Висновки

1. Експериментальними дослідженнями встановлено ефекти впливу на питому теплоємність полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі

поліаміду 6 двох методів їх одержання: метод 1- змішування компонентів у сухому вигляді; метод 2- змішування компонентів у розплаві полімеру:

- Значення теплоємності c_p композитів, одержаних за методом 1, може перевищувати відповідну величину для другого методу в 1,2 рази.
 - При збільшенні температури різниця між значеннями теплоємності композиту одержаного першим і другим способом збільшується і досягає максимальних значень при температурі 490 К для всіх видів наповнювачів.
2. Питома теплоємність досліджуваних композитів залежить від виду наповнювачів, вона максимальна при наповненні матриці алюмінієм, дещо нижча при наповненні міддю і найнижча при наповненні ВНТ.

Література

1. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Прокопов В.Г., Меранова Н.О. Теплофізичні властивості полімерних мікро- і нанокомпозитів та їх зв'язок зі структурними характеристиками полімерної матриці. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. № 3. С. 33-42. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.4>.

2. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Prokopov V., Meranova N., Fedosenko L., & et. Thermophysical properties and structure of the polymer matrix of micro- and nano-composites based on polyethylene. *МНЖ "Інтернаука"*. 2022. № 10(129). С. 19-22. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-10-8253>.

3. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. та ін. Теплопровідність полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату та ступінь кристалічності полімерної матриці. *МНЖ "Інтернаука"*. 2022. № 11(130). С. 32-37. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-11-8279>.

4. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О. та ін. Ступінь кристалічності полімерної матриці мікро- і нанокомпозитів на основі поліаміду 6. *МНЖ "Інтернаука"*. 2022. № 13. С.53-57. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-13-8307>.

5. Fialko N., Meranova N., Sherenkovskii J., Navrodska R., Babak V., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N., Konoreva O., Dinzhos R. Establishing patterns in the structure formation of polymer nanocomposites based on polyamide 6 during their crystallization processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 3(12(129)). P. 62-68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306965>.

6. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Косева Н.С. та ін. Особливості формування структури полімерних нанокомпозитів на основі поліаміду 6 в процесі їх кристалізації. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2024. № 7. С. 95-102. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-7-10156>.

7. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Косева Н.С., Полозенко Н.П. та ін. Дослідження структуроутворення полімерних нанокомпозитів на основі поліаміду 6 при його наповненні наночастинками діоксиду кремнія. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2024. № 8 (163). С. 83-88. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-8-10182>.

8. Фіалко Н.М., Меранова Н.О., Коржик В.М., Бабак В.П., Шеренковський Ю.В. та ін. Закономірності впливу на теплофізичні властивості полімерних мікро- і нанокомпозитів методів їх одержання. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. № 1. С. 146-156. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.11>.

9. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В. та ін. Исследование влияния на теплопроводящие свойства нанокомпозитов температурного режима их получения. *МНЖ «Інтернаука»*. 2021. № 12(112). С. 31-34. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-12-7529>.

10. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. та ін. Вплив тривалості змішування компонентів нанокompозиту на величину його теплоємності. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 5. С. 51-55. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-5-8009>.

11. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. та ін. Температурні залежності теплоємності та густини нанокompозитів на основі полікарбонату. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2022. № 7. С.65-69. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-7-8079>.

12. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R. та ін. Study of the temperature regime effect of obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4, № 5(112). Р. 21–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>.

13. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. та ін. Залежність коефіцієнта теплопровідності нанокompозитів на основі поліпропілену від часу змішування компонентів. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 5(124). С. 56-60. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-5-7999>.

14. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. та ін. Залежність теплопровідності полімерних мікро- і нанокompозиційних матеріалів на основі полікарбонату від масової частки наповнювача. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 6(125). С. 60-64. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-6-8053>.

15. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г. Теплопровідність і питома теплоємність мікро-і нанокompозитів на основі поліаміду 6. *Міжнародний науковий журнал*

"Інтернаука". 2022. № 12. С. 58-62. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-12-8291>

16. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В. Теплофізические свойства полимерных микро- и нанокомпозитов при использовании высокотеплопроводных наполнителей. *Progressive research in the modern world: 1st International scientific and practical conference* (October 5-7, 2022) BoScience Publisher, Boston, USA. 2022. P.188-196.

17. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В. та ін. Теплота кристалізації полімерних мікро-і нанокомпозиційних матеріалів для теплоенергетичного устаткування. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. № 5. С.26-27.

18. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Кліщ А.В., Хміль Д.П., Попружук І.О., Валько О.В. Теплопровідні властивості полімерних мікро- і нанокомпозитів для теплообмінних поверхонь. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2020. 1т., № 7 (87). С. 42-46.

19. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О. Створення низькотеплопровідних полімерних нанокомпозитів для внутрішніх газовідвідних стволів димових труб котелень. *Енергетика та автоматика*. 2020. № 5. С. 57-68. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/14641> (дата звернення: 01.05.2025).

20. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О. та ін. Теплофізичні властивості полімерних мікро-і нанокомпозитів для елементів теплоенергетичного обладнання. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: збірник праць*. Інститут промислової екології. К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2024. С.178-185.

21. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Кліщ А.В., Хміль Д.П. Високотеплопровідні полімерні мікро-і нанокомпозити. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2019. 1т., № 12 (74). С. 51-54.