

УДК: 536.24:533

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ МІКРО- І НАНОКОМПОЗИТІВ ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК ЗІ СТРУКТУРНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ

Фіалко Н.М.¹, член-кореспондент НАН України, Дінжос Р.В.², докт.техн.наук,
Шеренковський Ю.В.¹, канд. техн. наук, Прокопов В.Г.¹, докт.техн.наук,
Меранова Н.О.¹, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

²Миколаївський національний університет ім. В.О. Сухомлинського, вул. Микольська, 24, м. Миколаїв, 54030, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.4>

Наведено результати експериментальних досліджень теплопровідних властивостей полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену і полікарбонату, наповнених вуглецевими нанотрубками і частинками алюмінію. Представлено дані щодо кореляційної залежності між ступенем кристалічності полімерної матриці досліджуваних композитів та їх коефіцієнтом теплопровідності. Надано пояснення механізму такої залежності на основі закономірностей формування перколяційних структур з частинок наповнювача.

The results of experimental studies of the heat-conducting properties of polymer micro- and nanocomposites based on polyethylene and polycarbonate filled with carbon nanotubes and aluminum particles are presented. Data are submitted concerning the correlation between the degree of crystallinity of the polymer matrix of the studied composites and their heat conductivity coefficient. An explanation of the mechanism of this dependence is given on the basis of the regularities of the formation of percolation structures from filler particles.

Бібл. 16, рис. 4, табл. 3

Ключові слова: полімерні мікро- і нанокомпозити, теплопровідність, ступінь кристалічності, вуглецеві нанотрубки, мікрочастинки алюмінію.

a, b – коефіцієнти кореляційного рівняння;
 $\Delta I_m, \Delta I_{mc}$ – ентальпія плавлення композиту і повністю кристалічного полімеру;
 λ – коефіцієнт теплопровідності;

χ – ступінь кристалічності полімерної матриці;
 ω – масова частка наповнювача;
ВНТ – вуглецеві нанотрубки

Вступ

Перспективи застосування високотеплопровідних полімерних мікро- і нанокомпозитів безпосередньо пов'язані з вивченням їх теплофізичних властивостей. Створення вказаної модифікації полімерних композиційних матеріалів передбачає використання різних наповнювачів з високою теплопровідністю. Поряд з цим важливими є дослідження характеристик таких матеріалів при застосуванні широкого кола полімерних матриць.

Значний інтерес становлять також дослідження, спрямовані на встановлення зв'язку між теплофізичними властивостями високотеплопровідних полімерних матеріалів та їх структурою.

Аналіз літературних джерел

Різні аспекти дослідження теплофізичних властивостей полімерних мікро- і нанокомпозитів висвітлюється у великій кількості робіт [1-8]. Щодо теплопровідних

властивостей полімерних композиційних матеріалів, то їх дослідженню приділяється особлива увага [9-12]. Однак наявні публікації не вичерпують потреби всебічного вивчення цих властивостей. Актуальними є їх подальші дослідження у напрямі розширення номенклатури композиційних матеріалів щодо полімерних матриць і наповнювачів.

Стосовно досліджень питомої теплоємності полімерних мікро- і нанокомпозитів, то вони суттєво менш численні, ніж відповідні дослідження їх теплопровідних властивостей [13-15]. Крім того, ці дослідження часто носять допоміжний характер або супроводжуються вивченням інших фізичних характеристик композитів. Результати досліджень температурної залежності теплоємності полімерних мікро- і нанокомпозитів використовуються для визначення ступеня кристалічності їх матриць (див., наприклад, [16].) Однак в роботах цієї спрямованості прак-

тично не приділяється увага такому важливому аспекту, як встановлення зв'язку між ступенем кристалічності полімерної матриці і теплопровідними властивостями композиційних матеріалів.

Отже, виконаний аналіз свідчить про те, що важливими є дослідження теплофізичних властивостей високотеплопровідних полімерних мікро- і нанокомпозитів при використанні великого кола мікро- та нанонаповнювачів і полімерних матриць. Із наявних публікацій випливає також актуальність проведення досліджень взаємозв'язку між структурними характеристиками і теплопровідністю полімерних мікро- і нанокомпозитів.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей зміни теплопровідності полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену або полікарбонату від масової частки різних високотеплопровідних наповнювачів – ВНТ чи мікрочастинок АІ, а також в аналізі взаємозв'язку теплопровідних властивостей даних композитів та ступеня кристалічності їх полімерної матриці.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

- виконати комплекс експериментальних досліджень зі встановлення залежності теплопровідних властивостей одержуваних композитів від масової частини наповнювачів;
- за результатами експериментальних досліджень температурної залежності матеріалів, що розглядаються, виявити закономірності зв'язку теплопровідних властивостей композитів і ступеня кристалічності їх матриці.

Матеріали і методи досліджень

Розгляду підлягали полімерні мікро- та нанокомпозиційні матеріали на основі поліетилену або полікарбонату при їх наповненні ВНТ або мікрочастинками алюмінію. Одержання зазначених композитів здійснювалося із застосуванням методу, що базується на змішуванні компонентів у розплаві полімеру із застосуванням спеціального дискового екструдера [10].

Теплофізичні властивості досліджуваних композиційних матеріалів визначалися з урахуванням стандартних методичних підходів. Для визначення їх теплопровідності використовувався вдосконалений прилад ІТ-λ-400, а масової питомої теплоємності – метод диференціальної скануючої калориметрії на установці

DSC-2 з модифікованим програмним забезпеченням.

У ході проведення досліджень масова частка наповнювачів ω варіювалася від 0,3 до 10%. Методи отримання та характеристики наповнювачів, що використовуються, наведено в [11].

Ступінь кристалічності χ одержуваних композиційних матеріалів визначався на основі експериментальних залежностей теплоємності композитів від температури за формулою [16]

$$\chi = \frac{\Delta I_m}{\Delta I_{mc}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Результати досліджень та їх аналіз

Характерні результати виконаних досліджень представлено на рис. 1 – 4 і в табл. 1.

Зупинимося спочатку на розгляді експериментальних даних для полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену. Рис. 1 ілюструє зміну теплопровідності λ досліджуваних композитів від вмісту наповнювачів. Як видно, значення коефіцієнтів теплопровідності композитів суттєво залежать від масової частки наповнювача ω . Зі збільшенням вмісту наповнювача спостерігається підвищення значень λ . При цьому в усьому аналізованому діапазоні зміни ω теплопровідність композитів є більш високою при використанні як наповнювача ВНТ у порівнянні з застосуванням мікрочастинок АІ. Так, максимально досяжні рівні λ (при $\omega=10\%$) становлять 45,4 Вт/(м·К) та 26,7 Вт/(м·К) при наповненні поліетилену ВНТ та АІ відповідно.

Звертає увагу той факт, що характер зміни теплопровідності λ композитів у різних областях зміни ω виявляється різним. Як видно, можуть бути виділені три зони зміни ω , що відповідають різним темпам підвищення коефіцієнта теплопровідності композитів.

Перша зона відповідає діапазону зміни вмісту наповнювача від 0 до 2%. У цій зоні коефіцієнт теплопровідності аналізованих композитів не зазнає суттєвих змін. Важливо, що у вказаному діапазоні містяться значення першого та другого перколяційних порогів (табл. 1). Відповідно після досягнення цих порогів має місце помітне відносне підвищення теплопровідності композитів. Проте, в абсолютному вираженні ці зміни є порівняно невеликими.

Друга зона зміни ω характеризується значним зростанням коефіцієнта теплопровідності композитів, що

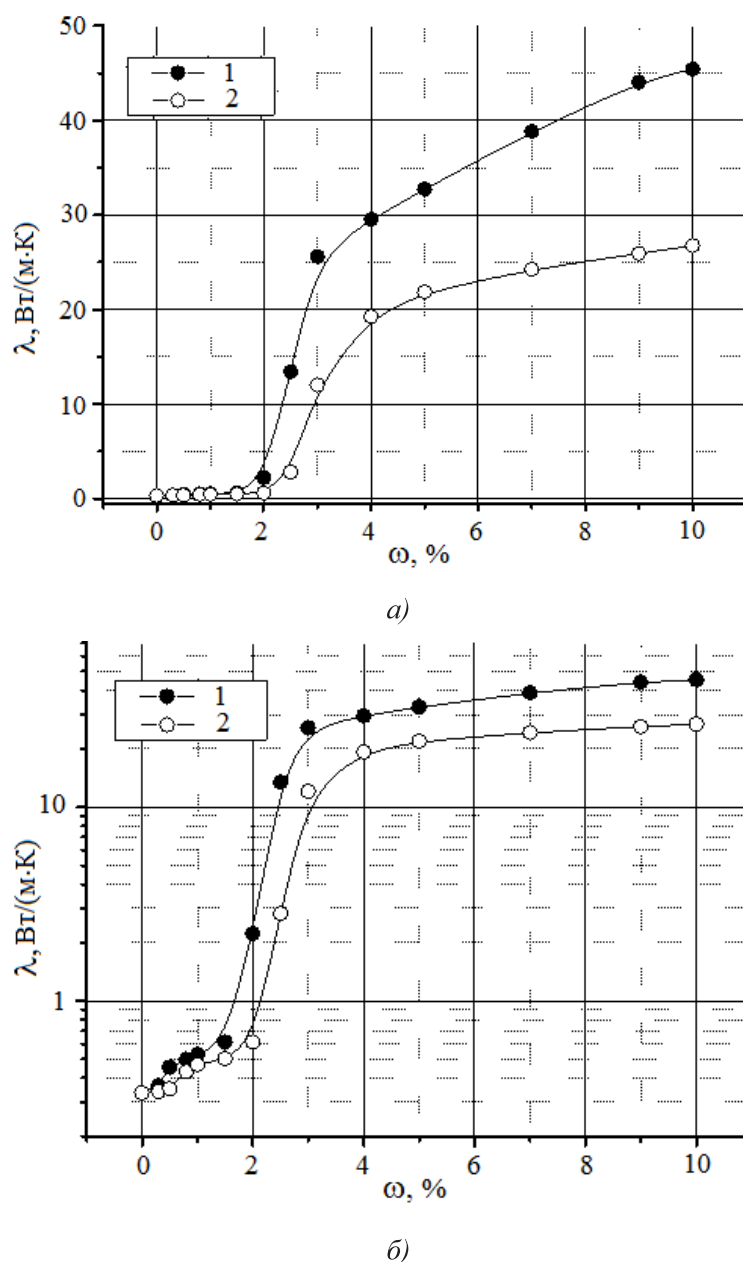


Рис. 1. Залежність $\lambda = \lambda(\omega)$ для мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену, наповненого різними наповнювачами: 1 – вуглецеві нанотрубки; 2 – мікрочастинки алюмінію; а, б – лінійна і логарифмічна шкала ординат

Таблиця 1. Значення порогів перколяції (%) для полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену і полікарбонату, наповнених ВНТ і частинками алюмінію

наповнювач	ВНТ		Al	
	Номер порогу перколяції			
матриця	1	2	1	2
поліетилен	0,40	1,55	0,55	1,98
полікарбонат	0,20	2,40	0,50	1,90

свідчить про інтенсивне формування перколяційних структур, відповідальних за теплопровідні властивості матеріалів, які розглядаються. Щодо меж цієї зони, то вони різні при використанні різних наповнювачів. Так, у разі наповнення поліетилену ВНТ вона охоплює область зміни ω приблизно від 2% до 3%, при його наповненні мікрочастинками Al – від 2% до 4%.

У третій зоні (що відповідає значенням ω 3-10% при використанні як наповнювача ВНТ, і 4-10% – мікрочастинок Al) темп зростання теплопровідності композитів різко знижується. Даний факт свідчить про те, що подальше розгалуження перколяційних структур зі зростанням ω призводить до менш інтенсивного формування теплопровідних каналів з частинок наповнювача.

Як видно з рис. 2, із зростанням ω спостерігається зменшення ступеня кристалічності χ полімерної матриці композиту. При цьому це зменшення виявляється значно суттєвішим при наповненні поліетилену ВНТ, ніж мікрочастинками Al. Так, у першій з цих ситуацій при збільшенні ω від 0 до 10% ступінь кристалічності матриці падає від 74% до 63,2%, а в другій – лише до 70,2%.

Як і у разі залежності $\lambda = \lambda(\omega)$ інтенсивність зниження ступеня кристалічності χ є різною в різних областях зміни масової частки наповнювача. Зіставлення даних на рис. 1 і 2 показує, що виділені вище три зони зміни ω також відповідають різним темпам зниження ступеня кристалічності χ .

У першій зоні збільшення кількості наповнювача суттєво позначається на величині ступеня кристалічності полімерної матриці композитів. Тобто тут ступінь кристалічності вельми чутливою до збільшення масової частки наповнювача. За цих умов частинки наповнювача є значними стеричними перешкодами для формування у полімерної матриці кристалічних структур.

У другій зоні зміни ω темпи падіння ступеня кристалічності полімерної матриці помітно знижуються, залишаючись вищими для полімеру, наповненого ВНТ.

Третя зона характеризується тим, що тут продовжується зниження ступеня кристалічності із зростанням масової частки наповнювача, хоча темп цього зниження дещо зменшується.

Отже, отримані дані свідчать про наявність певного зв'язку між теплопровідними властивостями полімерних мікро- і нанокомпозитів, що розглядаються, і ступенем кристалічності їх полімерної матриці. Для другої та третьої з розглянутих зон зміни масової частки наповнювача даний зв'язок може бути виражено залежністю

$$\lambda = a - b \cdot \chi \quad (2)$$

В табл. 2 наведено значення коефіцієнтів рівняння (2) для композитів на основі поліетилену.

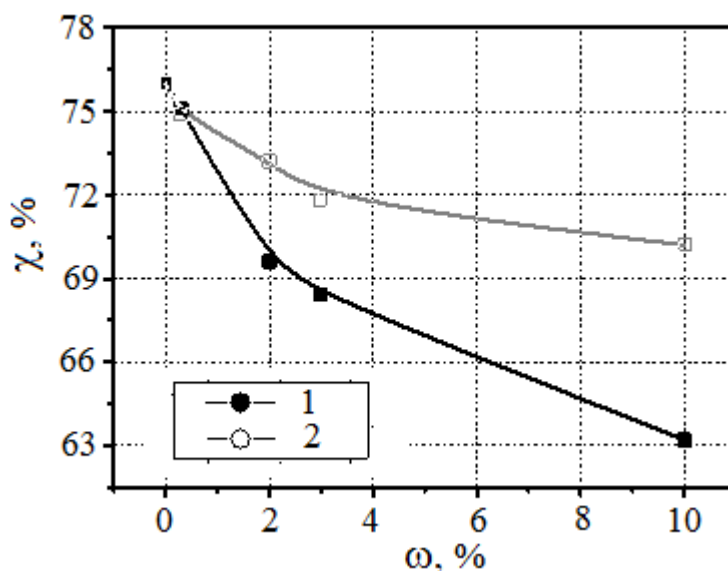


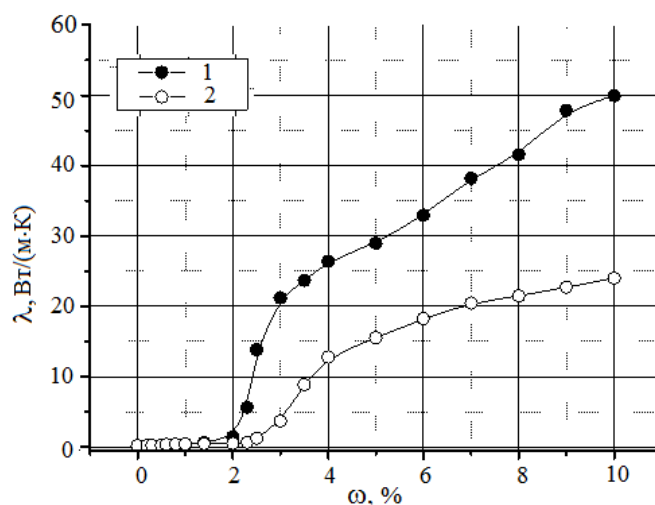
Рис. 2. Залежність $\chi = \chi(\omega)$ для мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену, наповненого ВНТ (1) та мікрочастинками алюмінію (2)

Перейдемо далі до розгляду результатів виконаних досліджень для мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату. Необхідно відмітити, що ступінь кристалічності полікарбонату $\chi = 24\%$; це приблизно

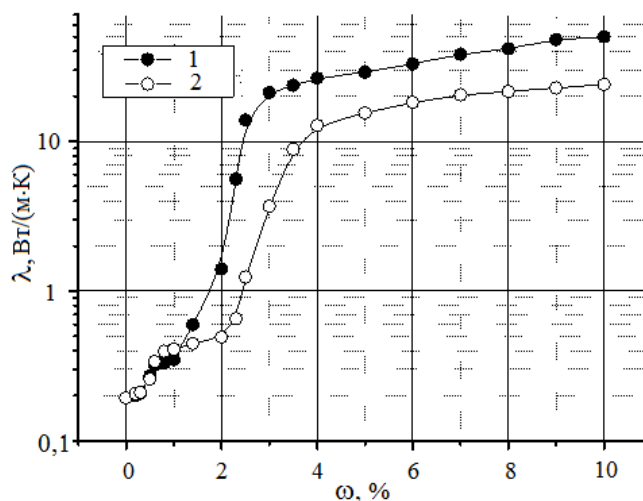
в 3 рази менше, ніж поліетилену ($\chi = 76\%$). Рис. 3 і 4 ілюструють залежності $\lambda = \lambda(\omega)$ та $\chi = \chi(\omega)$ для композитів на основі полікарбонату, наповнених ВНТ та мікрочастинками Al. Згідно з отриманими даними

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів a і b в залежності (2) для мікро- і нанокомпозитів на основі поліетилену для різних зон зміни масової частки наповнювача ω

Номер зони зміни ω	Коефіцієнт	Наповнювач	
		ВНТ	Al
2	a	1357,7	837,24
	b	19,47	11,43
3	a	286,4	411,6
	b	3,813	5,482



а)



б)

Рис. 3 Залежність $\lambda = \lambda(\omega)$ для мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату, наповненого різними наповнювачами: 1 – вуглецеві нанотрубки; 2 – мікрочастинки алюмінію; а, б – лінійна і логарифмічна шкала ординат

при використанні полімерної матриці з полікарбонату зазначені залежності якісно подібні до відповідних залежностей для композитів на основі поліетилену. Хоча при цьому мають місце певні кількісні відмінності.

Щодо залежності $\lambda = \lambda(\omega)$ для композитів на основі полікарбонату та поліетилену, то тут привертає увагу наявність помітних розбіжностей у темпах підвищення теплопровідності композитів у другій і третій зонах зміни ω . А саме, для композитів на основі полікарбонату ці темпи є нижчими в другій зоні зміни ω і більш високими в третій зоні. Так, при наповненні полімерів ВНТ у другій із зазначених зон для матриці з полікарбонату збільшення λ становить 19,8 Вт/(м·К), і для матриці з поліетилену 23,4 Вт/(м·К). У третій зоні значення коефіцієнтів теплопровідності зростають відповідно на 28,7 Вт/(м·К) і на 19,8 Вт/(м·К).

Наявні також певні відмінності в максимально досяжних рівнях теплопровідності композитів для $\omega = 10\%$, при застосуванні різних полімерних матриць. Наприклад, для полімерів, наповнених ВНТ, ці максимальні рівні становлять 50,0 і 45,4 Вт/(м·К) при використанні полімерної матриці з полікарбонату і поліетилену відповідно.

Кількісні відмінності в залежності $\chi = \chi(\omega)$ для композитів на основі полікарбонату та поліетилену є вельми великими. Це, як очевидно, зумовлено суттєво різними значеннями ступеня кристалічності полікарбонату та поліетилену.

Як свідчать отримані дані, суттєво різними для композитів на основі полікарбонату і поліетилену є також величини зменшення ступеня кристалізації в аналізованому діапазоні зміни масової частки наповнювача (рис. 2 і 4). Так, при наповненні полімерів ВНТ величина зазначеного зменшення становить 6,0% для матриці з полікарбонату і досягає 12,8% для матриці з поліетилену.

Щодо зв'язку між теплопровідними властивостями композитів на основі полікарбонату і ступенем кристалічності полімерної матриці, то він може бути виражений залежністю (2) при значеннях відповідних коефіцієнтів, наведених в табл. 3.

Висновки.

1. Для полімерних мікро- та нанокомпозитів на основі поліетилену або полікарбонату, наповнених ВНТ або частинками алюмінію, виконано комплекс експериментальних досліджень їх теплопровідних

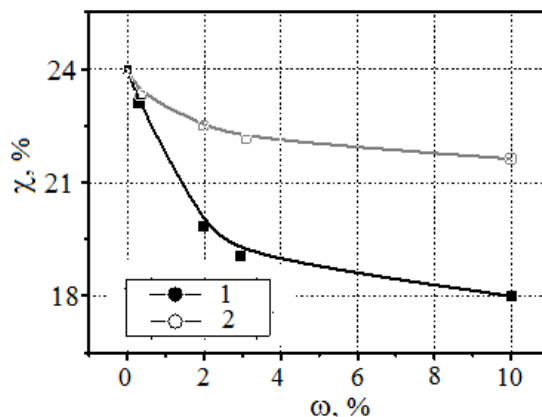


Рис. 4. Залежність $\chi = \chi(\omega)$ для мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату, наповненого ВНТ (1) та мікрочастинками алюмінію (2)

Таблиця 3. Значення коефіцієнтів a і b в залежності (2) для мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату для різних зон зміни масової частки наповнювача ω

Номер зони зміни ω	Коефіцієнт	Наповнювач	
		ВНТ	Al
2	a	439,2	707,8
	b	22,00	31,44
3	a	562,0	573,7
	b	28,46	25,37

властивостей. Отримано залежності теплопровідності полімерних композитів від масової частки наповнювача в діапазоні її зміни від 0,3 % до 10 %. Показано, що коефіцієнти теплопровідності композитів при наповненні полімерних матриць ВНТ можуть значно перевищувати відповідні величини при її наповненні частинками алюмінію. Встановлено можливість отримання полімерних композитів на основі полікарбонату з коефіцієнтами теплопровідності 50,0 та 25,7 Вт/(м·К) у разі використання як наповнювач відповідно ВНТ та частинок алюмінію при їх вмісті, що дорівнює 10 %.

2. На основі результатів експериментальних досліджень питомої теплоємності композитів отримано дані щодо ступеня кристалічності їх полімерної матриці. Встановлено, що зменшення ступеня кристалічності зі зростанням масової частки наповнювача є більш суттєвим при використанні як наповнювача ВНТ, ніж частинок алюмінію. Відмічається, що характер залежності $\chi = \chi(\omega)$ зумовлений тим, що при зростанні масової частки наповнювача збільшується ступінь розгалуженості перколяційних сіток, які є стеричними перешкодами для утворення кристалічних структур полімерної матриці. Показано, що має місце певна кореляційна залежність між ступенем кристалічності χ полімерної матриці мікро- і нанокомпозитів і їх коефіцієнтом теплопровідності λ . Наявність даної залежності пояснюється тим, що значення величин χ і λ значною мірою визначаються закономірностями формування перколяційних структур з частинок наповнювача.

Дане дослідження частково фінансувалося у межах проекту ДР № 012U110115 (наказ №257 від 25.02.2021) фундаментальних та прикладних досліджень та науково-технічних розробок закладів вищої освіти та наукових установ на 2021 р., що належать до сфери управління Міністерства освіти і науки України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Навродська Р.О. Теплофізичні властивості і структуроутворення полімерних мікро- і нанокомпозиційних матеріалів. Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2020. 142 с.
2. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Дінжос Р.В., Шевчук С.І., Меранова Н.О., Гнедаш Г.О. Ефективність використання полімерних мікро- і нанокомпозиційних матеріалів в теплоутилізаційних технологіях. Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2020. – 128 с.
3. Дінжос Р.В., Лисенков Е.А., Фіалко Н.М., Клепко В.В. Вплив методу введення наповнювача на теплофізичні властивості систем на основі термопластичних полімерів та вуглецевих нанотрубок. Фізика інженерії поверхні. 2014. Т.12. №4. С. 446-453.
4. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические характеристики высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов. Промышленная теплотехника. 2015. №5. С.5-15.
5. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродская Р.А. Полимерные микро- и нанокомпозиты как объекты теплофизических исследований для элементов теплоэнергетического оборудования. Промышленная теплотехника, 2017. №2. С. 36-45.
6. Дінжос Р.В., Лисенков Е.А., Фіалко Н.М. Вплив технології виготовлення та типу наповнювача на теплофізичні властивості нанокомпозиту на основі поліпропілену. Вопросы химии и химической технологии. 2015. 5. С.56-61.
7. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние типа полимерной матрицы на теплофизические свойства и структурообразование полимерных нанокомпозитов. Технологические системы. 2016. №3(76). С.49-60.
8. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В. Теплофизические основы создания полимерных микро- и нанокомпозитов для элементов энергетического оборудования. Промышленная теплотехника, 2015. №7. С.172-176.
9. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродская Р.А. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности полимерных микро- и нанокомпозитов для теплообменных аппаратов. Промышленная теплотехника. 2016. №1. С.5-14.
10. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N. Study of the temperature regime effect to obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4 №5(112), P. 21–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>.
11. Фіалко, Н. М., Дінжос, Р.В., Шеренковский, Ю. В., Меранова, Н. О., Навродская, Р. О. (2017). Теплопроводность полимерных микро- и нанокомпозитов на основе полиэтилена при различных способах их получения. Промышленная теплотехника. 39. 4. С. 21-26. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.03>
<http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/146>

12. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов на их теплофизические свойства. Промышленная теплотехника. 2015. №4. С.5-12.

13. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Alosko S., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Mankus I., Nedbaievska L. Establishment of regularities of influence on the specific heat capacity and temperature conductivity of polymer nanocomposites of a complex of defining parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 6 №12 (114). P.34-39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245274>.

14. Sharifzadeh, E., Cheraghi, K. (2021). Temperature-affected mechanical properties of polymer nanocomposites from glassy-state to glass transition temperature. Mechanics of Materials, 160, 103990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103990>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663621002234?via%3Dihub>

15. Reguieg, F., Ricci, L., Bouyacoub, N., Belbachir, M., Bertoldo, M. (2019). Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT. Polymer Bulletin, 77 (2), 929–948. doi: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02782-3>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-019-02782-3>

16. Долинский, А.А., Фиалко, Н.М., Динжос, Р.В., Навродская, Р.А. (2015). Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов на их теплофизические свойства. Промышленная теплотехника. №4. С.5-12.

doi: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.01>

<http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/128>

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF POLYMER MICRO- AND NANOCOMPOSITES AND THEIR CONNECTION WITH THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE POLYMER MATRIX

Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskiy Ju., Prokopov V., Meranova N.

¹ Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03680, Ukraine

² V.O. Sukhomlynskyi National University of Mykolaiv, 24, Nikolska Str., Mykolaiv 54030 Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.4>

The results of experimental studies of the heat-conducting properties of polymer micro- and nanocomposites based on polyethylene and polycarbonate filled with carbon nanotubes and aluminum particles are presented. The dependences of the heat conductivity of the considered polymer composite materials on the content of the filler are obtained. The possibility of obtaining polymer composites based on polycarbonate with a coefficient of heat conductivity of 50.0 and 25.7 W/(m K) using carbon nanotubes and aluminum particles as fillers, respectively, has been established. The results of studies of the degree of crystallinity of polymer matrices of the considered composites are presented. Data are submitted concerning the correlation between the indicated degree of crystallinity and the heat conductivity coefficient of the studied composite materials. An interpretation of the mechanism of such a dependence is given on the basis of the laws governing the formation of percolation structures from filler particles.

Представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств полимерных микро- и нанокомпозитов на основе полиэтилена и поликарбоната, наполненных углеродными нанотрубками и частицами алюминия. Получены зависимости теплопроводности рассматриваемых полимерных композиционных материалов от содержания наполнителя. Установлена возможность получения полимерных композитов на основе поликарбоната с коэффициентом теплопроводности 50,0 и 25,7 Вт/(м•К) при использовании в качестве наполнителей углеродных нанотрубок и частичек алюминия соответственно. Приведены результаты исследований степени кристалличности полимерных матриц

рассматриваемых композитов. Представлены данные, касающиеся корреляционной зависимости между указанной степенью кристалличности и коэффициентом теплопроводности исследуемых композиционных материалов. Дана интерпретация механизма такой

References 16, figure 4, table 3.

Keywords: polymer micro- and nanocomposites, heat conductivity, degree of crystallinity, carbon nanotubes, aluminum microparticles.

1. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Prokopov V.G., Sherenkovskii Ju.V., Meranova N.O., Navrodska R.O. Thermophysical power and structure creation of polymer micro- and nanocomposite materials. Mykolaiv: SPD Rumyantseva G.V., 2020. 142 p.

2. Fialko N.M., Navrodska R.O., Dinzhos R.V., Shevchuk S.I., Meranova N.O., Gnedash G.O. Efficiency of using polymer micro- and nanocomposite materials in heat recovery technologies. Mykolaiv: SPD Rumyantseva G.V., 2020. - 128 p.

3. Dinzhos R.V., Lisenkov E.A., Fialko N.M., Klepko V.V. Introducing the method of introducing a new emphasis on the thermophysical power of systems based on thermoplastic polymers and carbon nanotubes. Physics of surface engineering. 2014.V.12. No. 4. pp. 446-453.

4. Dolinskii A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.A. Thermophysical characteristics of highly thermally conductive polymer micro- and nanocomposites. Industrial heat engineering. 2015. No. 5.C.5-15.

5. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.A. Polymer micro- and nanocomposites as objects of thermophysical research for elements of heat and power equipment. Industrial heat engineering, 2017. No. 2. pp. 36-45.

6. Dinzhos R.V., Lisenkov E.A., Fialko N.M. Influx of technology in the preparation of that type on the thermophysical power of a nanocomposite based on polypropylene. Questions of chemistry and chemical technology. 2015. 5. P.56-61.

7. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.A. Influence of the type of polymer matrix on the thermophysical properties and structure formation of polymer nanocomposites. Technological systems. 2016. No. 3 (76). pp.49-60.

8. Fialko N.M., Dinzhos R.V. Thermophysical foundations for the creation of polymer micro- and nanocomposites for elements of power equipment. Industrial heat engineering, 2015. No. 7. pp.172-176.

9. Dolinskii A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.A. Temperature dependences of thermal conductivity coefficients of polymer micro- and nanocomposites for heat exchangers. Industrial heat engineering. 2016. No. 1. pp.5-14.

10. *Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N.* Study of the temperature regime effect to obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4 №5(112), P. 21–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>.
11. *Fialko, N. M., Dinzhos, R. V., Sherenkovskiy, Yu. V., Meranova, N. O., Navrodska, R. O.* (2017). Thermal conductivity of polymer micro- and nanocomposites based on polyethylene with various methods of their preparation. *Industrial heat engineering*. 39. 4. S. 21-26. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.03>
<http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/146>
12. *Dolinskii A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.A.* Influence of methods for obtaining polymeric micro- and nanocomposites on their thermophysical properties. *Industrial heat engineering*. 2015. No. 4. pp.5-12.
13. *Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Alosko S., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Mankus I., Nedbaievska L.* Establishment of regularities of influence on the specific heat capacity and temperature conductivity of polymer nanocomposites of a complex of defining parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 6 №12 (114). P.34-39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245274>.
14. *Sharifzadeh, E., Cheraghi, K.* (2021). Temperature-affected mechanical properties of polymer nanocomposites from glassy-state to glass transition temperature. *Mechanics of Materials*, 160, 103990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103990>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663621002234?via%3Dihub>
15. *Reguieg, F., Ricci, L., Bouyacoub, N., Belbachir, M., Bertoldo, M.* (2019). Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT. *Polymer Bulletin*, 77 (2), 929–948. doi: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02782-3>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-019-02782-3>
16. *Dolinsky, A.A., Fialko, N.M., Dinzhos, R.V., Navrodska, R.A.* (2015). Influence of methods for obtaining polymeric micro- and nanocomposites on their thermophysical properties. *Industrial heat engineering*. No. 4. pp.5-12.
doi: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.01>
<http://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/128>

Отримано 31.08.2022
Received 31.08.2022