

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент 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  
Кафедра фізики і математики  
Миколаївський національний університет ім. В.О. Сухомлинського*

**Dinzhos Roman**

*Doctor of Technical Sciences, Professor  
Department of Physics and Mathematics  
V.O. Sukhomlinskiy National University of Mykolaiv*

**Шеренковський Юлій Владиславович**

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

**Sherenkovskiy Julii**

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

**Меранова Наталія Олегівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,*

*провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Meranova Nataliia**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),*

*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*

**Навродська Раїса Олександрівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,*

*провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Navrodska Raisa**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),*

*Senior Scientific Researcher, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Полозенко Ніна Петрівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Polozenko Nina**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Альошко Сергій Олександрович**

*кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Aleshko Sergey**

*Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Кутняк Ольга Миколаївна**

*науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Kutnyak Olha**

*Scientific Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Пархоменко Олександр Юрійович**

*кандидат фізико-математичних наук,*

*доцент кафедри фізики і математики*

*Миколаївський національний університет імені В. О. Сухомлинського*

**Parkhomenko Oleksandr**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,*

*Associate Professor of the Department of Physics and Mathematics*

*V.O. Sukhomlinskiy National University of Mykolaiv*

**ЕКЗОТЕРМИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ  
ПРИ ЇХ НАПОВНЕННІ ВУГЛЕЦЕВИМИ НАНОТРУБКАМИ  
CRYSTALLIZATION EXOTHERMS FOR POLYMER COMPOSITES  
FILLED WITH CARBON NANOTUBES**

*Анотація. Наведено дані експериментальних досліджень щодо кристалізації полімерних наноккомпозитів на основі полікарбонату.*

**Ключові слова:** екзотерми кристалізації, вуглецеві нанотрубки, полімерні композити.

**Summary.** The data of experimental studies of crystallization of polymer nanocomposites based on polycarbonate are presented.

**Key words:** crystallization exotherms, carbon nanotubes, polymer composites.

**Вступ.** В останній період спостерігається тенденція до розширення областей використання полімерних матеріалів за рахунок застосування різних композицій. Дані композиції, як відомо, мають значно ширший спектр фізико-механічних і технологічних властивостей. При цьому особливо виділяються полімерні мікро- і нанокомпозити, властивості яких покращені введенням у полімерну матрицю відносно незначної кількості частинок наповнювача відповідних розмірів [1-14].

Дана стаття присвячена експериментальним дослідженням закономірностей кристалізації нанокомпозитів на основі полікарбонату, наповнених вуглецевими нанотрубками.

**Постановка задачі та методика проведення досліджень.** В роботі ставиться завдання експериментального визначення екзотерм затвердіння композиту при його охолодженні з розплаву із заданою постійною швидкістю. Тут тепловий потік, що відводиться від композиту, визначався в сухій атмосфері азоту методом диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) на установці Perkin Elmer DSC-2 з модифікованим програмним забезпеченням від IFA Gmb, Ulm. При цьому зразок, поміщений в комірку, нагрівався до температури 550 К, що перевищує температуру плавлення матриці приблизно на 50 К, витримувався при даній температурі протягом 180 с і далі охолоджувався до температури рівної 400 К при фіксованій швидкості охолодження.

**Результати досліджень.** На рис. 1 та в табл. 1 наведено характерні результати експериментальних досліджень, що стосуються визначення екзотерм затвердіння для полімерних нанокомпозитів, що розглядаються.

Розглянемо спочатку особливості впливу швидкості охолодження композитів  $V_t$  на основні параметри процесу їх кристалізації. Згідно з отриманими даними для аналізованих композитів при різній масовій частці наповнювача має місце в цілому аналогічний характер зміни цих параметрів зі зростанням величини  $V_t$  (рис. 1). Тут у першу чергу привертає увагу дуже істотне зниження максимуму відведеного від композиту теплового потоку  $Q_{max}$  з підвищенням швидкості охолодження  $V_t$  при помітному зміщенні положення даного максимуму на кривій  $Q = f(T)$  в область нижчих температур..

Підвищення швидкості охолодження композиту  $V_t$  призводить також до зниження температури початку  $T_N$  та кінця  $T_K$  кристалізації. При цьому помітно підвищується інтервал температури кристалізації  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_N - T_K$ ). Наприклад, для нанокомпозиту, що містить 4% вуглецевих нанотрубок, зазначений інтервал  $\Delta T$  становить 6,5 К при  $V_t = 0,0083$  К/с і досягає 18,9 К при  $V_t = 0,333$  К/с.

Зупинимося коротко на розгляді ефектів впливу масової частки наповнювача на характер отриманих екзотерм кристалізації. Як видно із рис. 1, з підвищенням  $\omega$  спостерігається трансформація унімодального піку на кривій  $Q = f(T)$  у бімодальний. При цьому зазначена бімодальність із зростанням  $\omega$  стає все більш яскраво вираженою. Важливо підкреслити, що масова частка наповнювача  $\omega$ , при якій виявляється зазначена трансформація, виявляється різною для різних композиційних матеріалів. Як випливає з результатів виконаних експериментальних досліджень, у разі полімерного композиту, наповненого вуглецевими нанотрубками, бімодальний пік на кривих  $Q = f(T)$  з'являється при значенні  $\omega$  рівному  $\omega = 0,5\%$ .

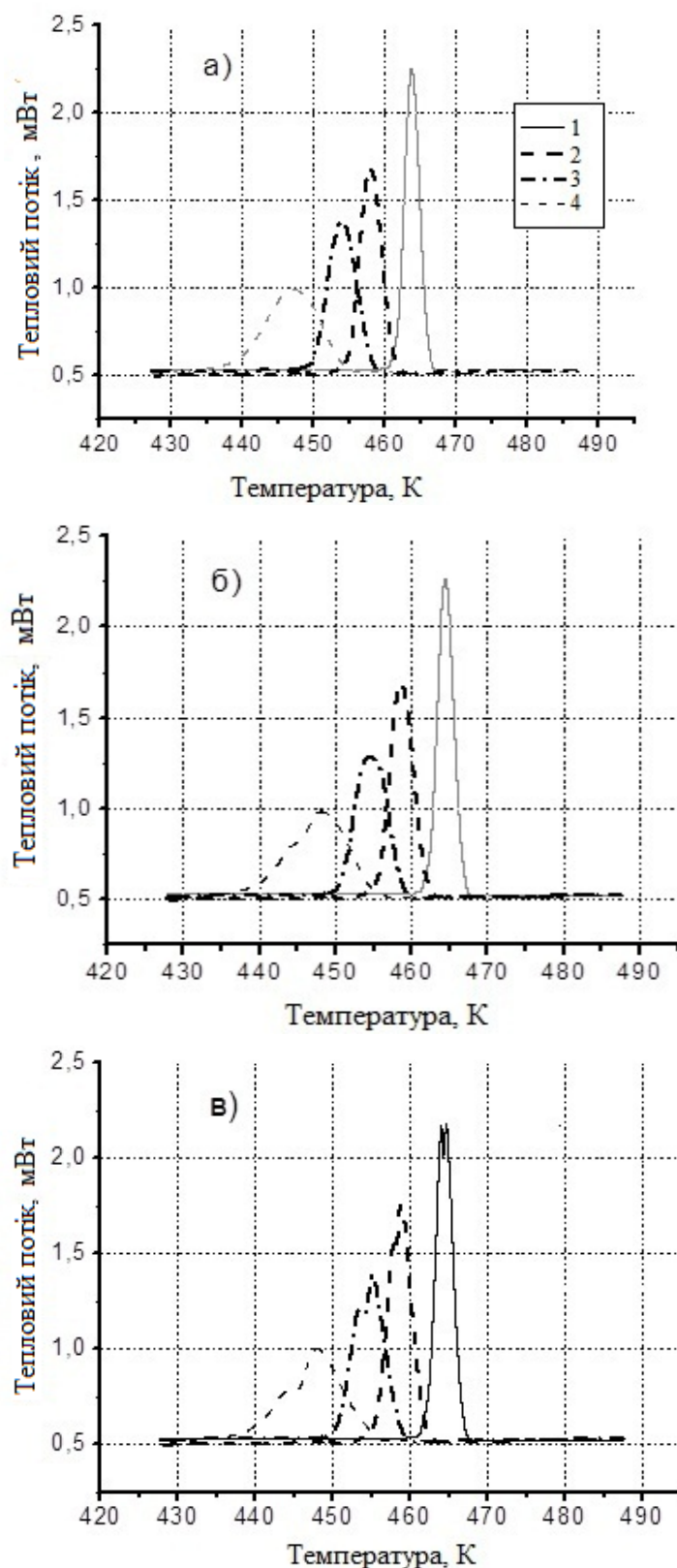


Рис. 1. Екзотерми кристалізації для полімерних нанокompозитів на основі полікарбонату, наповнених вуглецевими нанотрубками, при вмісті наповнювачів  $\omega = 0,2\%$  (а),  $0,3\%$  (б) та  $4,0\%$  (в) при різних швидкостях охолодження композиту з розплаву : 1 -  $V_t = 0,0083\text{ K/c}$ ; 2 -  $0,0333\text{ K/c}$ ; 3 -  $0,0833\text{ K/c}$ ; 4 -  $0,333\text{ K/c}$

Таблиця 1

**Характеристики процесу кристалізації полімерного нанокompозиту на основі полікарбонату, наповненого вуглецевими нанотрубками, при різному вмісті наповнювача  $\omega$  і різних швидкостях  $V_t$  охолодження композиту з розплаву**

$\omega$ , %	$T_N, K$	$T_M, K$	$T_k, K$	$\Delta T, K$	$Q_{max}$ , мВт
$V_t = 0,0083$ K/c					
0	467,5	463,0	460,0	7,5	1,79
0,2	466,9	463,7	461,0	5,9	2,24
0,3	467,6	464,3	461,2	6,4	2,27
4	467,4	464,0; 464,6	460,9	6,5	2,18
$V_t = 0,0166$ K/c					
0	467,1	462,3	459,2	7,9	1,70
0,2	465,0	460,8	457,8	7,2	1,94
0,3	465,6	461,5	457,8	7,8	1,95
4	465,6	461,7; 461,0	458,0	7,6	1,90
$V_t = 0,0333$ K/c					
0	465,2	460,0	457,0	8,2	1,55
0,2	462,4	458,0	454,2	8,2	1,68
0,3	463,0	458,6	454,4	8,6	1,70
4	462,9	458,7; 457,8	454,6	8,3	1,73
$V_t = 0,0833$ K/c					
0	461,2	455,4	451,9	9,3	1,32
0,2	458,2	453,7	449,7	8,5	1,37
0,3	458,7	454,5	449,8	8,9	1,28
4	458,8	455,1; 453,4	450,2	8,6	1,38
$V_t = 0,166$ K/c					
0	457,9	451,2	446,9	11,0	1,16
0,2	457,5	451,2	445,1	12,4	1,19
0,3	458,1	451,9; 450,1	445,5	12,6	1,20
4	458,1	452,1; 450,1	445,2	12,9	1,21
$V_t = 0,333$ K/c					
0	456,5	448,4	441,5	15,0	0,97
0,2	455,0	446,7	438,3	16,7	0,98
0,3	455,6	448,0; 444,0	437,7	17,9	0,99
4	455,6	448,1; 443,9	436,7	18,9	1,00

При проведенні експериментів були отримані відповідні екзотерми кристалізації для полімерної матриці при різних швидкостях  $V_t$  охолодження з розплаву. Тут характер екзотерм в цілому аналогічний таким для композитів, що розглядаються, при відносно невеликому вмісті наповнювача ( $\omega = 0,2$  %). Тобто при всіх досліджених швидкостях



охолодження  $V_t$  екзотерми кристалізації полімерної матриці містили лише унімодальні піки, рівень яких знижувався зі зростанням  $V_t$ .

**Висновки.** Експериментально отримані екзотерми кристалізації для полімерних нанокомпозитів. Виявлено ефекти впливу швидкості охолодження композиту з розплаву  $V_t$  та частки наповнювача  $\omega$  на різні характеристики процесу кристалізації. Зокрема показано, що зі зростанням  $V_t$  відбувається зниження максимуму теплового потоку  $Q_{max}$ , що відводиться від композиту, і зменшення температур початку  $T_N$  та кінця  $T_K$  кристалізації при помітному підвищенні інтервалу температур кристалізації  $\Delta T$ . Встановлено також факт трансформації унімодального піку на екзотермах кристалізації в бімодальний при підвищенні масової частки наповнювача  $\omega$ .

### Література

1. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности полимерных микро- и нанокомпозитов для теплообменных аппаратов. Промышленная теплотехника. 2016. № 1. С. 5-14.
2. Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние типа полимерной матрицы на теплофизические свойства и структурообразование полимерных нанокомпозитов. Технологические системы. 2016. № 3(76). С. 49-60.
3. 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.
4. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические характеристики высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов. Промышленная теплотехника. 2015. № 5. С.5-15.



5. Дінжос Р.В., Лисенков Е.А., Фіалко Н.М. Вплив технології виготовлення та типу наповнювача на теплофізичні властивості нанокompозиту на основі поліпропілену. Вопросы химии и химической технологии. 2015. № 5. С. 56-61.
6. 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.
7. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Дінжос Р.В., Шевчук С.І., Меранова Н.О., Гнедаш Г.О. Ефективність використання полімерних мікро- і нанокompозиційних матеріалів в теплоутилізаційних технологіях. Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2020. 128 с.
8. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В. Теплофизические основы создания полимерных микро- и нанокompозитов для элементов энергетического оборудования. Промышленная теплотехника. 2015. №7. С. 172-176.
9. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N. Study of the temperature regime effect of obtaining nanocomposites on their heat-conducting properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 4. №5 (112). P. 21–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>
10. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Шевчук С.І. Ефективність використання полімерних мікро- і нанокompозитів для теплообмінних апаратів газо-газового типу. Промышленная теплотехника. 2017. №5. С. 12-18.
11. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродская Р.А. Полимерные микро- и нанокompозиты как объекты теплофизических исследований для элементов теплоэнергетического оборудования. Промышленная теплотехника, 2017. №2. С. 36-45.

12. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродська Р.О., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В. Закономірності кристалізації полімерних мікрокомпозиційних матеріалів при різних методах їх отримання. *Промышленная теплотехника*. 2018. №2. С. 5-11.
13. Долинский А.А., Фіалко 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.
14. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Aloszko S., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Mankus I., Nedbaievskia 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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245274>