

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 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 (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*

Косева Нелі Стаянова

*кандидат хімічних наук, професор
Лабораторія фосфоровмісних мономерів та полімерів
Інститут полімерів Болгарської академії наук*

Koseva Neli

*PhD, Professor
Laboratory of Phosphorus-Containing Monomers and Polymers
Institute of Polymers of the Bulgarian Academy of Sciences*

Федосенко Леонід Петрович

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

Fedosenko Leonid

*Doctor of Technical Sciences, 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*

Хміль Дмитро Петрович

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

Khmil Dmytro

PhD, Junior Senior 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

Чехаровська Марина Ігорівна

старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Chekharovska Maryna

Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПОЛІМЕРНИХ
НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІАМІДУ 6 В ПРОЦЕСІ ЇХ
КРИСТАЛІЗАЦІЇ**

**FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF
POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYAMIDE 6 IN THE
PROCESS OF THEIR CRYSTALLIZATION**

***Анотація.** У статті представлено результати досліджень закономірностей структуроутворення полімерних наноккомпозитів на основі поліаміду 6, наповненого вуглецевими нанотрубками. Дані отримані в ході експериментально-розрахунковим досліджень при варіюванні масової*

частки наповнювача – від 0,2 % до 4,0 % та швидкості охолодження композиту з розплаву – від 0,5 K/хв. до 20 K/хв.

Теоретичні дослідження з визначення механізмів структуроутворення нанокомпозитів базувалися на аналізі експериментально одержаних екзотерм кристалізації. На початковій стадії кристалізації механізми структуроутворення встановлено згідно з рівнянням нуклеації, на стадії кристалізації в об’ємі композиту – в рамках модифікованого рівняння Колмогорова – Аврамі. Показано наявність двох механізмів структуроутворення – площинного і об’ємного.

Ключові слова: полімерні нанокомпозити, вуглецеві нанотрубки, екзотерми кристалізації, механізми структуроутворення.

Summary. The article presents the results of studies of the structure formation patterns of polymer nanocomposites based on polyamide 6 filled with carbon nanotubes. The data were obtained in the course of experimental and computational studies with varying the mass fraction of the filler – from 0.2 to 4.0% and the cooling rate of the composite from the melt – from 0.5 K/min to 20 K/min. Theoretical studies to determine the mechanisms of structure formation of nanocomposites were based on the analysis of experimentally obtained crystallization exotherms. At the initial stage of crystallization, the mechanisms of structure formation are established according to the nucleation equation, at the stage of crystallization in the volume of the composite – within the framework of the modified Kolmogorov – Avraami equation. The presence of two mechanisms of structure formation – planar and volumetric – is shown.

Key words: polymer nanocomposites, carbon nanotubes, crystallization exotherms, structure formation mechanisms.

Актуальність проблеми. В останній період спостерігається тенденція до розширення сфер застосування полімерних мікро- і

нанокомпозитів [1-5]. Серед таких сфер особливо виділяються енергетичне обладнання, електронна апаратура, деталі та вузли установок оборонного призначення тощо.

Важливість створення полімерних нанокмпозиційних матеріалів пов'язана, насамперед, з підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик відповідного обладнання. Розроблення таких матеріалів для цього обладнання є конкурентною альтернативою традиційно застосовуваним матеріалам щодо їх вагових характеристик, стійкості до агресивних середовищ, екологічності, вартості тощо.

Дослідженню характеристик нанокмполитів присвячено цілий ряд наукових робіт [6-37]. Для розширення використання полімерних мікро- і нанокмполитів необхідні подальші дослідження комплексу їх властивостей. При цьому основні характеристики композитів значною мірою визначаються особливостями їх структуроутворення. З огляду на це, дослідження залежності характеристик структуроутворення таких матеріалів від низки визначальних факторів є актуальною проблемою.

Одним з перспективних нанокмполитів є композиційні матеріали на основі поліаміду 6. Застосування цих нанокмполитів покликано забезпечити підвищену довговічність, надійність та зниження масогабаритних характеристик деталей з таких матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В ході широкого кола досліджень [27-37] встановлено залежність теплофізичних властивостей полімерних мікро- і нанокмполитів від цілого ряду факторів. Наприклад, важливим впливовим чинником є технологічні особливості їх одержання. Дослідженню питань, пов'язаних з кінетикою кристалізації полімерних мікро- і нанокмполитів при їх охолодженні з розплаву, присвячена значна кількість публікацій, зокрема [19-22; 25; 26]. В роботах досліджено полімерні композиційні матеріали на різній основі при застосуванні

декількох наповнювачів. Для аналізу закономірностей кристалізації авторами представлено різні кінетичні моделі.

Виявлено також зв'язок властивостей полімерних нанокомпозиційних матеріалів зі структурними характеристиками полімерної матриці. Це зумовило появу ряду робіт, присвячених дослідженню особливостей формування структури полімерних композиційних матеріалів. Так, дані робіт [17; 18] свідчать про те, що кінетична модель Колмогорова-Аврамі і відповідна модифікована модель успішно пояснюють процеси утворення структур в полімерних композиційних матеріалах. Проте у більшості робіт, в яких досліджуються особливості математичного опису кристалізації полімерних композитів, не розглядається вплив ряду визначальних параметрів на характеристики процесу кристалізації. Зокрема, важливе значення має врахування таких факторів, як швидкість охолодження з розплаву полімеру, концентрація наповнювачів тощо.

Виконаний аналіз публікацій за темою виявив необхідність системних досліджень структуроутворення полімерних композитів з урахуванням залежності характеристик процесу їх кристалізації при охолодженні з розплаву від низки визначальних факторів.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Метою проведеного дослідження є визначення особливостей структуроутворення полімерних нанокомпозиційних матеріалів на основі поліаміду 6, наповненого вуглецевими нанотрубками. Для досягнення поставленої мети на основі експериментально одержаних екзотерм кристалізації виконано теоретичні дослідження з визначення характеристик структуроутворення полімерних нанокомпозитів на різних стадіях кристалізації полімерної матриці.

Експериментально-розрахункова методика аналізу процесів кристалізації, що застосовувалась в роботі, передбачала послідовне виконання експериментальних і розрахункових досліджень. Експериментальні дослідження підлягали у побудові екзотерм

кристалізації, розрахункові – у теоретичному визначенні характеристик структуроутворення композитів на основі одержаних екзотерм кристалізації.

Для одержання полімерних нанокомпозитів використовувався метод, що базується на змішуванні компонентів у розплаві полімеру із застосуванням дискового екструдера. Детальний опис методу та принципова схема екструдера наводиться в [23].

Методика досліджень. Розрахунок параметрів структуроутворення композиційного матеріалу проведено у відповідності з методикою, загальні положення якої викладено в роботі [17].

При розрахунковому визначенні параметрів структуроутворення розгляду підлягали дві стадії даного процесу – початкова стадія кристалізації (стадія нуклеації) і стадія кристалізації в усьому об’ємі композиту.

На першій стадії структуроутворення визначалися приведені параметр нуклеації a_m і приведені транспортний бар’єр K_m із застосуванням рівняння нуклеації.

Дослідження кристалізації в усьому об’ємі композиту базувалися на уявленні про наявність двох механізмів кристалоутворення: один стосується кристалізації власне полімерної матриці, другий – з центрами кристалізації на частинках наповнювача.

До такої фізичної ситуації було застосовано модифіковане рівняння Колмогорова-Аврамі. При цьому проведено порівняння ролі механізмів кристалізації шляхом розрахунків за рівнянням Колмогорова-Аврамі, що відповідає лише кристалізації власне на матриці.

Результати досліджень та їх аналіз. Параметри структуроутворення для нанокомпозитів із застосуванням розрахункових методів визначено на основі виконаних експериментальних досліджень з побудови екзотерм кристалізації. При цьому, як вже зазначалось, враховано, що початкова

стадія відповідає зародженню окремих структурно впорядкованих підобластей, а друга – кристалізації в об’ємі нанокompозита.

Результати розрахункових досліджень для першої стадії структуроутворення, одержані на основі рівняння нуклеації для двох значень параметра форми m ($m=1$, $m=2$), представлено в табл. 1, де a_1 , a_2 – приведений параметр нуклеації, K_1 , K_2 – приведений транспортний бар’єр; R_1 , R_2 – коефіцієнт кореляції експериментальних і розрахункових даних.

Таблиця 1

Параметри структуроутворення на початковій стадії кристалізації полімерних композитів на основі поліаміду 6, наповнених вуглецевими нанотрубками, при швидкості охолодження з розплаву $V_c=5$ К/хв і різних вмістах наповнювачів ω

ω , %	a_1 , К	K_1 , 1/с	R_1	a_2 , 10^{-6} К	K_2 , 1/с	R_2
Поліамід 6						
0	0,168	0,425	0,9991	2,51	1,68	0,9996
Поліамід 6, наповнений вуглецевими нанотрубками						
0,2	0,198	0,382	0,9923	2,95	1,67	0,991
0,3	0,204	0,362	0,9954	2,99	1,60	0,992
1,0	0,213	0,354	0,9942	3,07	1,49	0,996
4,0	0,234	0,341	0,9902	3,31	0,32	0,997

Характер зміни приведених параметрів нуклеації a_1 і a_2 в залежності від масової частки наповнювача для досліджуваних нанокompозитів, наведено на рис. 1.

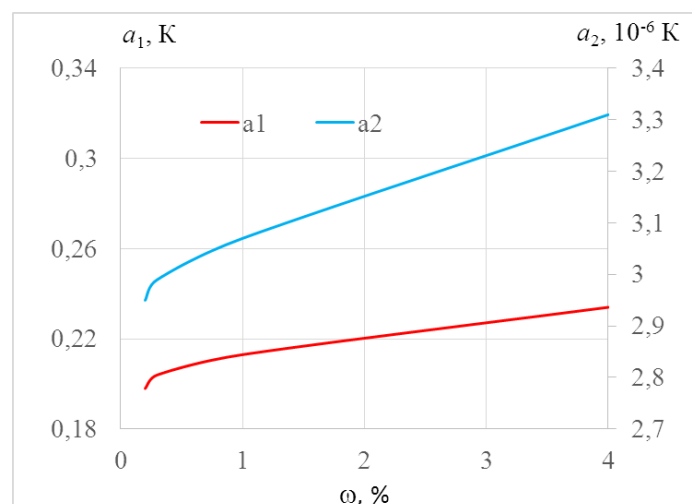


Рис. 1. Залежність від масової частки наповнювача ω приведених параметрів нуклеації a_1 і a_2 для полімерних композитів на основі поліаміду 6, наповненого вуглецевими нанотрубками: a_1 – параметр нуклеації a_1 , a_2 – параметр нуклеації a_2

Дані розрахункових досліджень для стадії структуроутворення в об'ємі нанокомпозита представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри структуроутворення на стадії кристалізації в об'ємі полімерних композитів на основі поліаміду 6, наповнених вуглецевими нанотрубками для різних швидкостей охолодження з розплаву V_t при вмісті наповнювача $\omega=4\%$

V_t K/xv	Рівняння Колмогорова–Аврамі			Модифіковане рівняння Колмогорова – Аврамі					
	n	$K_n, 10^{-5} K^{-n}$	$\chi^2, 10^{-5}$	f	n'	$K'_n, 10^{-5} K^{-n'}$	n''	$K''_n, 10^{-5} K^{-n''}$	$\chi^2 \cdot 10^5$
Поліамід 6, наповнений вуглецевими нанотрубками									
0,5	3,85	915	23	0,76	3,85	164	4,96	745	3
2	3,84	70	27	0,75	3,84	50	5,01	20	4
5	3,82	20	57	0,74	3,82	14	5,02	35	4
20	3,80	15	61	0,73	3,80	42	5,05	2	3

Надрядковими індексами «'» і «''» в табл. 2 позначено величини щодо першого і другого з механізмів кристалізації. Величина f в табл. 2 – відносна частка механізму структуроутворення, пов'язаного з кристалізацією власне полімерної матриці, величина χ^2 – дисперсія.

На рис. 2 для прикладу наведено значення псевдопараметрів n' , n'' для досліджуваних нанокомпозитів.

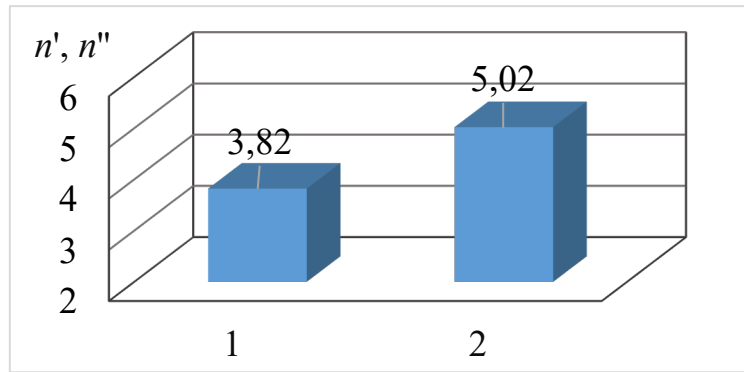


Рис. 2. Значення псевдопараметрів форми n' , n'' для полімерних композитів на основі поліаміду 6, наповненого вуглецевими нанотрубками, при вмісті наповнювача $\omega=4\%$: і швидкості охолодження з розплаву полімера $V_t=5$ К/хв: 1 – n' , 2 – n''

Результати, наведені в табл. 1, свідчать про те, що має місце цілком задовільне узгодження експериментальних і розрахункових даних.

Щодо зміни зі зростанням вмісту наповнювача ω приведенного параметра нуклеації a_m і приведенного транспортного бар'єра K_m , то при $m=1$ та $m=2$ характер даної зміни є схожим (табл. 1). Збільшення ω приводить до підвищення значень a_m і до зменшення величини K_m . Зростання a_m , як відомо, пов'язане зі збільшенням швидкості кристалізації на її початковій стадії, а зниження K_m – зі зменшенням обмежень щодо транспорту сегментів матриці через поверхню ламель-кристал.

При дослідженні закономірностей структуроутворення на другій стадії кристалізації – кристалізації в об'ємі матеріалу в цілому, одержані дані аналізуються, як вже зазначалося, в припущенні наявності двох механізмів кристалоутворення. Перший з цих механізмів пов'язаний з кристалізацією власне полімерної матриці і реалізується на флуктуаціях густини полімеру. Другий механізм стосується кристалізації, в якій роль її центрів виконують частинки наповнювача.

Як свідчать одержані дані (табл. 1, рис. 1) для поліаміда 6 псевдопараметр форми $n' \approx 4$ в усьому розглянутому діапазоні зміни швидкості V_t . Вказане значення n' відповідає механізму напруженої матриці.

Стосовно другого з вищевказаних механізмів, то він є таким же як і для полімерної матриці. Псевдопараметр форми n'' для всіх значень V_t дорівнює приблизно 5.

Виконані дослідження дозволили виявити особливості формування структури полімерних нанокомпозитів на основі поліаміду 6 в процесі їх кристалізації з розплаву. При цьому встановлено залежності характеристик процесу структуроутворення нанокомпозитних матеріалів від таких факторів, як масова частка наповнювача та швидкість охолодження композиту.

Висновки. На основі результатів експериментів з побудови екзотерм кристалізації для нанокомпозитів на основі полімеру поліаміду 6, наповненого ВНТ, встановлено закономірності структуроутворення на двох стадіях кристалізації – початковій (стадії нуклеації) і стадії кристалізації в усьому об'ємі композиту. Для першої стадії кристалізації згідно з рівнянням нуклеації показано наявність двох механізмів кристалізації – площинного та об'ємного. Для другої стадії кристалізації виконано аналіз одержаних даних експериментальних досліджень в межах стандартного і модифікованого рівнянь Колмогорова-Аврамі. Встановлено, що на даній стадії кристалізація відбувається за двома механізмами. Перший з цих механізмів пов'язаний з кристалізацією власне полімерної матриці і реалізується на флуктуаціях густини полімеру. Другий механізм стосується кристалізації, центрами якої слугують частинки наповнювача. Показано, що перший і другий механізм відповідає механізму напруженої матриці.

Отримані в ході досліджень дані про особливості формування структури розглянутих нанокомпозитів надають додаткову інформацію про властивості матеріалів і, відповідно, розширюють можливості щодо їх використання в різних областях техніки.

Література

1. 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. *Інститут технічної теплофізики НАН України*. 2020. 128 с.
2. 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. doi: <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.057>.
3. 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. № 7 (87). С. 42-46. URL: <https://www.internauka.com/issues/2020/7/5936> (дата звернення: 26.07.2024).
4. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Кліщ А.В., Хміль Д.П. Високотеплопровідні полімерні мікро- і нанокомпозити. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2019. № 12(74). С. 51-54.
5. Фіалко Н.М., Навродская Р.О., Дінжос Р.В., Шевчук С.І. Водогрійні конденсаційні теплоутилізатори із застосуванням нанокомпозиційних матеріалів для газоподавальних опалювальних котлів. *Науковий вісник НЛТУ*. 2018. 28, № 2. С. 124-128.
6. Bulavin L.A., Zabashta Yu.F., Vergun L.Yu., Alekseev A.N., Yablochkova K.S., Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lazarenko M.V., Andrusenko D.A., Lazarenko M.M. Nanoclusters and sol–gel transition in water solutions of rigid-chain polymers. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2023. 765:1. P. 82-89. doi: <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2215021>.
7. Zabashta Yu.F., Lazarenko M.M., Alekseev O.M., Ushcats M.V., Hnatiuk K.I., Dinzhos R.V., Fialko N.M., Vergun L.Yu., Bulavin L.A. Features

of nanocrystal melting. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2023. 752:1. P. 31-41. doi: <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2091270>.

8. Sobchuk A.O., Lazarenko M.M., Yablochkova K.S., Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lazarenko M.V., Andrusenko D.A., Gryn S.V., Brytan A.V., Alekseev A.M. Effects of molecular structure on the dielectric relaxation of substituted cellulose derivatives. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2023. 751:1. P. 109-120. doi: <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073535>.

9. Fialko N., Dinzhos R., Meranova N., Sherenkovskii J., Polozenko N. Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites when they are obtained by different methods. Theoretical foundations in research in Engineering: collective monograph. Andrushchak I. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2022. 181 p. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-foundations-in-research-in-engineering/> (дата звернення: 26.07.2024).

10. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii J., Meranova N., Prokopov V., Babak V., Korzhyk V., Izvorska D., Lazarenko M., Makhrovskiy V. Influence on the thermophysical properties of nanocomposites of the duration of mixing of components in the polymer melt. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022 Vol. 2, No. 5 (116): Applied physics. P. 25-30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255830>.

11. Hnatiuk K.I., Lazarenko M.M., Alekseev S.A., Razghonova K.S., Yablochkova K.S., Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lazarenko M.V., Alekseev A.N. Investigation of relaxation processes and phase transitions in the silica gel-undecylenic acid system using IR spectra in a wide temperature range. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2022. P. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2066800>.

12. Sobchuk A.O., Lazarenko M.M., Yablochkova K.S., Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lazarenko M.V., Andrusenko D.A., Gryn S.V., Brytan A.V., Alekseev A.M. Effects of molecular structure on the dielectric relaxation of

substituted cellulose derivatives. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2022. № 5/4. P. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073535>

13. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Babak V., Korzhyk V., Lazarenko M., Polozenko N., Parkhomenko O., Makhrovskiy V. Establishing the influence of the type of micro- and nanofillers on the thermophysical properties of highly heat conductive polymer composites based on polyamide 6. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 4 (5 (118)). P. 15-20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.263417>.

14. 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. № 5 (112). P. 21-26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>.

15. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Alosko 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 (114). P. 34-39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245274>.

16. 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. *Інститут технічної теплофізики НАН України*. 2020. 142 с.

17. Dinzhos R., Fialko N., Prokopov V., Sherenkovskiy Ju., Meranova N., Koseva N., Korzhik V., Parkhomenko O., Zhuravskaya N. Identifying the influence of the polymer matrix type on the structure formation of microcomposites when they are filled with copper particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 5/6 (107). P. 49-57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>.

18. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Структурообразование полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната в процессах их кристаллизации. *Промышленная теплотехника*. 2015. 37(3). С. 5-15.

19. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Косева Н.С., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Носенко А.О., Попружук І.О., Валько О.В. Теплота кристалізації полімерних нанокомпозитів на основі полікарбонату при його наповненні вуглецевими нанотрубками. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2020. № 1. С. 66-71. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/1/5567> (дата звернення: 26.07.2024).

20. Дінжос Р.В., Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Навродська Р.О., Малецька О.Є., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Попружук І.О., Валько О.В. Дослідження залежності процесів кристалізації полімерних мікрокомпозитів від швидкості їх охолодження. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2020. № 18. С. 37-41. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/18/6503> (дата звернення: 26.07.2024).

21. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В., Полозенко Н.П., Малецька О.Є., Попружук І.О., Валько О.В. Закономірності кристалізації полімерних мікрокомпозитів при їх наповненні мікрочастинками міді. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2020. № 18. С. 67-71. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/18/6502> (дата звернення: 26.07.2024).

22. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Косєва Н.С., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Навродська Р.О. Теплота кристалізації високотеплопровідних полімерних композитів на основі поліетилену при його наповненні мікрочастинками міді. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. № 2. С. 19-26.

23. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Navrodska R., Izvorska D., Korzhyk V., Lazarenko M., Koseva N. Establishing patterns in the effect of temperature regime when manufacturing nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 5(112). С. 21-26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>.

24. Дінжос Р.В., Лисенков Е.А., Фіалко Н.М., Клепко В.В. Вплив нанонаповнювача на механізм кристалізації систем на основі поліпропілену та аеросил. *Полімерний журнал*. 2019. 41 (2). С. 116-122.

25. 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. *Промислова теплотехніка*. 2018. 40, № 2. С. 5-11.

26. Dinzhos R., Fialko N., Prokopov V., Sherenkovskiy Ju., Meranova N., Koseva N., Korzhik V., Parkhomenko O., Zhuravskaya N. Identifying the influence of the polymer matrix type on the structure formation of microcomposites when they are filled with copper particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 5/6 (107). Р. 49-57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214810>.

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

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

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

30. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Навродська Р.О., Полозенко Н.П., Кутняк О.М., Альошко С.О., Пархоменко О.Ю. Дослідження залежності густини нанокompозитів від тривалості змішування компонентів у розплаві полімеру. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 6(125). С. 56-59. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-6-8045>.

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

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

33. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Навродська Р.О., Полозенко Н.П., Альошко С.О., Кутняк О.М., Пархоменко О.Ю. Екзотерми кристалізації для полімерних композитів при їх наповненні вуглецевими нанотрубками. *Міжнародний*

науковий журнал "Інтернаука". 2022. № 7. С. 70-74. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-7-8092>.

34. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Навродська Р.О., Полозенко Н.П., Альошко С.О., Кутняк О.М., Махровський В.М. Особливості кристалізації полімерних композитів, наповнених мікрочастинками алюмінію. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2022. № 8(127). С. 61-65. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-8-8110>.

35. Fialko N., Dinzhos R., Sherenkovskii Ju., Prokopov V., Meranova N., Fedosenko L., Yurchuk V., Dashkovska I., Popruzhuik I., Klishch A. Thermophysical properties and structure of the polymer matrix of micro- and nano-composites based on polyethylene. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2022. № 10(129). С. 19-22. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-10-8253>.

36. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Прокопов В.Г., Федосенко Л.П., Кутняк О.М., Юрчук В.Л., Попружук І.О., Кліщ А.В. Теплопровідність полімерних мікро- і нанокомпозитів на основі полікарбонату та ступінь кристалічності полімерної матриці. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2022. № 11(130). С. 32-37. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-11-8279>.