

УДК 536.242

ЗАКОНОМІРНОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ МІКРОКОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РІЗНИХ МЕТОДАХ ЇХ ОТРИМАННЯ

Фіалко Н.М.¹, член-кор. НАН України, Дінжос Р.В.², канд. фіз.-мат. наук, Навродська Р.О.¹, канд. техн. наук, Меранова Н.О.¹, канд. техн. наук, Шеренковський Ю.В.¹, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2 а, Київ, 03680, Україна

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

Наведено результати досліджень закономірностей структуроутворення при кристалізації полімерного мікрокомполиту на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками алюмінію. Представлено дані порівняльного аналізу механізмів структуроутворення при застосуванні різних методів отримання композитів.

Приведены результаты исследований закономерностей структурообразования при кристаллизации полимерного микрокомпозита на основе полиэтилена, наполненного микрочастицами алюминия. Представлены данные сравнительного анализа механизмов структурообразования при использовании различных методов получения композитов.

The results of patterns studies of structure formation during the crystallization of a polymer microcomposite based on polyethylene filled with aluminum microparticles are presented. The data of a comparative analysis of the structure formation mechanisms in the use of different methods for the preparation of composites.

Бібл. 15, табл. 3, рис. 1

Ключові слова: полімерні мікрокомполіти, мікрочастинки алюмінію, структуроутворення, екзотерми кристалізації.

a – зведений параметр нуклеації;
 f – відносна об'ємна частка кристалічної фази, що відповідає кристалізації на флуктуаціях густини полімеру;
 K – зведений транспортний бар'єр;
 K_n^m – ефективна константа швидкості;
 m – безрозмірний параметр форми;
 n – псевдопараметр форми;
 Q_{Π}, Q_{Π}^{\max} – питомий тепловий потік та його максимальне значення;
 R – коефіцієнт кореляції;
 T – температура;
 T_N, T_K – температура початку і кінця кристалізації;

ΔT – температурний інтервал кристалізації;
 T_M – температура розплаву, що відповідає максимальному значенню питомого теплового потоку;
 t – час;
 V_t – швидкість охолодження;
 α – відносна об'ємна частка кристалічної фази;
 τ – зведений час, $\tau = V_t \cdot t$;
 χ^2 – дисперсія;
 ω – масова частка наповнювача.
Верхні індекси «'» і «''» відповідають першому і другому механізмам кристалізації

Вступ

Перспективність застосування полімерних мікро- і нанокомпозитів у інженерній практиці зумовлена такими їх характеристиками, як підвищена корозійна стійкість, низька питома вага, широкий діапазон теплопровідних властивостей тощо [1-9]. Так, високотеплопровідні модифікації мікро- та нанокомпозитів можуть ефективно використовуватися для виготовлення різного теплоутилізаційного устаткування, забезпечуючи можливість його експлуатації в агресивних середовищах, низькі масогабаритні показники та ін. [10-15].

Завдання розробки таких матеріалів потребують проведення досліджень, спрямованих на вивчення особливостей формування їх структури в процесі кристалізації, що суттєво впливає на властивості цих матеріалів. На особливу увагу заслуговують дослідження, пов'язані з аналізом впливу методів отримання полімерних композитів на закономірності їх структуроутворення.

Дана стаття присвячена дослідженню закономірностей структуроутворення полімерних мікрокомпозитів

на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, при застосуванні різних методів отримання цих композитів.

Методика проведення досліджень

Експериментально-розрахункова методика дослідження процесів кристалізації включала два етапи. Перший етап полягав у побудові експериментальних екзотерм кристалізації композиту при його охолодженні з розплаву з заданою постійною швидкістю. При цьому зразок, розміщений у комірці, нагрівався до температури, що перевищує температуру плавлення полімеру на 50 К, витримувався при даній температурі 180 с і далі охолоджувався до температури 400 К при фіксованій швидкості його охолодження ($V_t = 0,00833 \dots 0,333$ К/с). Питомий тепловий потік, що відводиться від композиту, визначався в атмосфері сухого азоту методом диференціальної скануючої калориметрії з використанням приладу Перкіна-Елмера DSC-2 з модифікованим програмним забезпеченням від IFA GmbH. Другий

етап полягав у теоретичному визначенні на основі отриманих експериментальних даних характеристик процесу кристалізації: а) на стадії зародження окремих структурно-впорядкованих підобластей з використанням рівняння нуклеації

$$\ln\{V_t[(m+1)T_N - T_M](T_M)^m/T_N^2(\Delta T)^{m+1}\} = \ln(K_m/a_m) - a_m(T_M)^m/T_N(\Delta T)^m; \quad (1)$$

б) на стадії формування таких структур в усьому об'ємі композиту із застосуванням стандартного і модифікованого рівнянь Колмогорова – Аврамі

$$\alpha(\tau) = 1 - \exp(-K_n \tau^n), \quad (2)$$

$$\alpha(\tau) = f[1 - \exp(-K'_n \tau'^n)] + (1-f)[1 - \exp(-K''_n \tau''^n)]. \quad (3)$$

Щодо експериментальних методів одержання полімерних композитів, то в роботі застосовувалися два методи: метод I, заснований на змішуванні компонентів, які знаходяться у сухому вигляді, із застосуванням магнітної мішалки і ультразвукового диспергатора при подальшому гарячому пресуванні отриманої композиції, і метод II, який базується на змішуванні компонентів у розплаві полімеру з застосуванням дискового екструдера при подальшому наданні композиту необхідної форми методом гарячого пресування.

Застосовувані як наповнювач мікрочастинки алюмінію одержувались з алюмінієвих ошурків шляхом їх розтирання у шаровому млині до утворення частинок розміром (0,5 ... 1,0) мкм. У ході досліджень масова частка наповнювача змінювалася від 0,2 до 4,0 %.

Результати досліджень та їх аналіз

Характерні результати експериментальних досліджень, які стосуються визначення екзотерм кристалізації для полімерних композитів, що розглядаються, при застосуванні різних методів їх отримання наводяться на рис. 1 та в табл. 1. Як свідчать представлені дані, для обох методів отримання композитів при різних масових частках наповнювача спостерігається в цілому подібний характер зміни основних параметрів кристалізації з підвищенням швидкості охолодження V_t . А саме, зі зростанням V_t знижуються температури початку T_N і кінця T_K кристалізації (остання при цьому змінюється більш суттєво) і помітно збільшується інтервал температур кристалізації ΔT . Так, при $\omega = 1,0\%$ величина ΔT становить: для методу I – 10,4 К при $V_t = 0,00833$ К/с і 14,8 К при $V_t = 0,333$ К/с та для методу II відповідно 8,7 К і 12,1 К.

Щодо максимального значення питомого теплового потоку $Q_{\text{пр}}^{\text{max}}$, то з підвищенням швидкості охолодження V_t має місце його зниження при зміщенні положення на кривій $Q_{\text{пр}} = f(T)$ в область нижчих температур.

Відносно закономірностей впливу масової частки наповнювача ω на характеристики отриманих екзотерм кристалізації, то вони можуть дещо відрізнитися для різних методів одержання композитів. Так, температури початку кристалізації T_N для композитів, отрима-

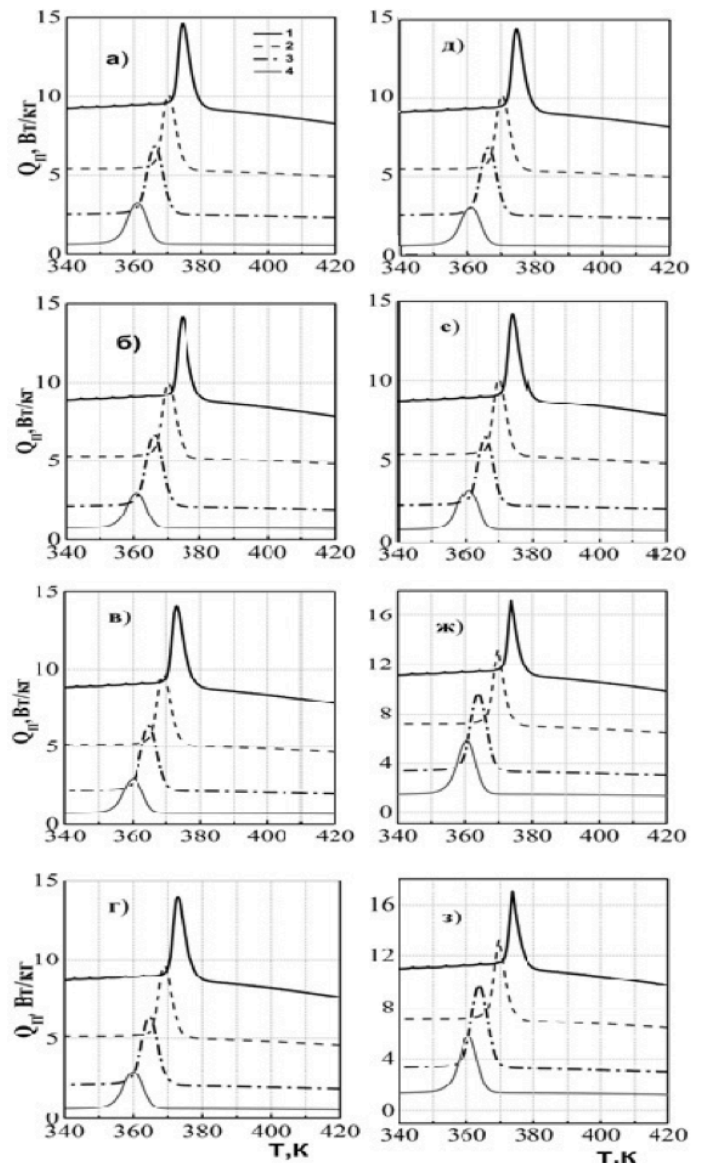


Рис. 1. Екзотерми кристалізації полімерних мікрокомпозитів на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, при його масовій частці $\omega = 0,2\%$ (а, д), $0,3\%$ (б, е), $1,0\%$ (в, ж), $4,0\%$ (з, з) за умов отримання композитів методом I (а-г) і методом II (д-з) для різних швидкостей їх охолодження з розплаву: 1 – $V_t = 0,00833$ К/с; 2 – $0,0333$ К/с; 3 – $0,0833$ К/с; 4 – $0,333$ К/с.

них різними методами, при фіксованій величині V_t незначно зменшується зі збільшенням ω . Температури ж кінця кристалізації T_K змінюються для методів I і II по-різному. У разі застосування методу I в цілому має місце тенденція до зниження температури T_K при зростанні масової частки наповнювача. Для композитів, отриманих на основі методу II, величина ω несуттєво впливає на температуру T_K при $V_t = 0,00833$ К/с і $0,0333$ К/с. З подальшим зростанням швидкості охолодження V_t ,

Таблиця 1. Характеристики процесу кристалізації полімерних мікрокомполімерів на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, при різних методах їх отримання.

ω , %	T_N , К	T , К	T_k , К	T , К	Q_{II}^{max} Вт/кг	ω , %	T_N , К	T , К	T_k , К	T , К	Q_{II}^{max} , Вт/кг
метод I						метод II					
$V_i = 0,00833$ К/с											
0,2	382,0	376,4	371,8	10,2	14,6	0,2	381,8	376,3	371,8	10,0	14,4
0,3	381,8	376,2	371,5	10,3	14,2	0,3	381,5	376,1	371,4	10,1	14,1
1	380,5	375,0	370,1	10,4	14,1	1	380,2	376,3	371,5	8,7	17,2
4	380,2	374,8	369,9	10,3	14,0	4	380,0	376,2	371,4	8,6	17,0
$V_i = 0,0333$ К/с											
0,2	379,3	373,0	367,8	11,5	10,1	0,2	379,1	373,0	368,0	11,1	10,2
0,3	379,2	373,1	368,0	11,2	10,0	0,3	378,9	372,9	367,9	11,0	10,1
1	378,2	372,2	367,2	11,0	9,7	1	378,0	372,6	368,2	9,8	13,2
4	378,0	372,1	367,1	10,9	9,6	4	377,8	372,5	368,0	9,8	13,0
$V_i = 0,0833$ К/с											
0,2	376,0	368,8	362,7	13,3	6,8	0,2	375,9	368,8	362,5	13,4	6,8
0,3	375,8	368,9	362,8	13,0	6,6	0,3	375,6	368,5	362,4	13,2	6,5
1	375,0	367,9	361,8	13,2	6,3	1	374,6	368,6	363,3	11,3	9,5
4	374,9	367,8	361,6	13,3	6,2	4	374,5	368,4	363,2	11,3	9,4
$V_i = 0,333$ К/с											
0,2	366,2	358,2	351,1	15,1	3,2	0,2	366,1	358,6	351,1	15,0	3,0
0,3	366,0	358,0	351,0	15,0	3,1	0,3	365,9	358,0	351,0	14,9	3,2
1	365,2	357,3	350,4	14,8	3,0	1	365,2	358,7	353,1	12,1	5,9
4	365,0	357,2	350,2	14,8	3,0	4	365,0	358,6	353,2	11,8	5,8

температура кінця кристалізації T_k дещо зростає при $\omega = 1,0$ і $4,0$ %. Відповідно інтервал температур кристалізації ΔT у разі методу II є помітно меншим, ніж для методу I для всіх значень V_i при вказаних величинах ω .

Згідно з одержаними даними (табл. 1 і рис. 1) при фіксованій швидкості охолодження V_i значення потоку Q_{II}^{max} , що відповідають різним масовим часткам наповнювача ω , у разі застосування методу I є близькими за величиною. Для композитів, отриманих методом II, ці значення помітно підвищуються при $\omega = 1,0$ % і $4,0$ %. Так, при $V_i = 0,333$ К/с величина Q_{II}^{max} становить $3,0$ Вт/кг для $\omega = 0,2$ % і $5,9$ Вт/кг для $\omega = 1,0$ %.

Отримані експериментальні екзотерми кристалізації, як вже зазначалося, слугували основою для теоретичного визначення характеристик структуроутворення. При дослідженні початкової стадії кристалізації розв'язуванню підлягало рівняння нуклеації (1). З метою аналізу розмірності кристалоутворення дане рівняння розв'язувалося при значеннях безрозмірного параметра форми $m = 1$ і $m = 2$.

В табл. 2 наведено розв'язок рівняння (1) для різних

масових часток наповнювача ω при різних методах отримання досліджуваних полімерних мікрокомполімерів. Як видно, має місце цілком задовільна кореляція між експериментальними і розрахунковими даними. Однак, при $m = 1$ значення коефіцієнтів кореляції R_1 є суттєво меншими, ніж величини відповідних коефіцієнтів R_2 при $m = 2$. Вказане свідчить про наявність двох механізмів кристалізації на її початковій стадії, а саме двохвимірному площинному ($m = 1$) і трьохвимірному, об'ємному ($m = 2$). При цьому перевищення значень R_2 над R_1 вказує на певне переважання об'ємного механізму над площинним.

Звертає на себе увагу також той факт, що зазначене переважання залежить певним чином від масової частки наповнювача ω і методу отримання композитів. А саме, при застосуванні методу I переважання об'ємного механізму над площинним дещо зменшується зі збільшенням ω . Щодо методу II, то при його використанні співвідношення механізмів кристалоутворення практично не залежить від масової частки наповнювача і є близьким до ситуації ненаповненого полімеру.

Таблиця 2. Параметри структуроутворення на початковій стадії кристалізації полімерних мікрокомполімерів на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, при різних методах їх отримання.

ω , %	a_1 , К	K_1 , 1/с	R_1	a_2 , 10^{-6} К	K_2 , 1/с	R_2
Метод I						
0	0,149	0,0590	0,790	2,621	0,114	0,943
0,2	0,158	0,0501	0,8083	2,945	0,109	0,981
1	0,172	0,0387	0,8992	3,315	0,084	0,988
4	0,201	0,0231	0,8844	3,891	0,059	0,949
Метод II						
0	0,149	0,0590	0,790	2,621	0,114	0,9430
0,2	0,152	0,0501	0,8019	2,852	0,102	0,9915
1	0,168	0,0345	0,8101	3,093	0,064	0,9971
4	0,185	0,0138	0,7986	4,12	0,053	0,9949

Стосовно другої стадії кристалізації (кристалізації в усьому об'ємі композиту), то тут експериментальні екзотерми кристалізації розглядалися в припущенні наявності двох механізмів кристалізації, перший з яких пов'язаний з кристалізацією власне полімерної матриці (що реалізується на флуктуаціях густини полімеру) і другий – з кристалізацією, в якій роль її центрів відіграють частинки наповнювача. Відповідно результати експериментів щодо кінетики кристалізації аналізувались згідно з рівняннями Колгорово – Аврамі (2) та його модифікованої версії (3).

Одержані дані (табл. 3) свідчать про те, що перший з вказаних механізмів кристалізації для всіх розглянутих значень масової частки наповнювача ω і швидкості охолодження V_t є об'ємним ($n = 3$) для обох методів отримання композитів. Щодо другого механізму кристалізації, то тут є певні відмінності при застосуванні методів I і II. А саме, при використанні методу I вказаний механізм кристалізації на мікрочастинках наповнювача є об'ємним ($n \approx 3$) і не залежить від величини ω . У разі отримання композитів за методом II цей механізм трансформується від об'ємного ($n \approx 3$) до площинного ($n \approx 2$) при збільшенні масової частки наповнювача.

Висновки

1. Виконано експериментально-теоретичні дослідження щодо визначення механізмів структуроутворення при кристалізації з розплаву полімерних композитів на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, для двох методів отримання даних композитів, що базуються на змішуванні компонентів у сухому вигляді (метод I) і у розплаві полімеру (метод II). Дослідження проведено в діапазоні зміни масової частки наповнювача ω від 0,2% до 4,0% і варіюванні швидкості охолодження V_t композиту з розплаву від 0,00833 до 0,333 К/с.

2. Проведено порівняльний аналіз експериментальних екзотерм кристалізації досліджуваних композитів

для двох методів їх отримання. Виявлено закономірності впливу даних методів на рівні температур початку і кінця кристалізації, значення максимуму питомого теплового потоку тощо.

3. На основі результатів експериментальних досліджень у відповідності з рівнянням нуклеації встановлено закономірності структуроутворення пропонованих композитів на початковій стадії їх кристалізації. Показано, що на даній стадії наявні два механізми кристалізації – площинний і об'ємний. Встановлено також, що співвідношення вказаних механізмів певним чином залежить від методу отримання композитів і масової частки наповнювача.

4. Виконано аналіз механізмів структуроутворення на стадії кристалізації в об'ємі композиту в цілому на основі рівнянь Колгорово – Аврамі. Показано, що кристалізація на флуктуаціях густини полімеру відбувається за об'ємним механізмом для обох методів отримання композитів. Встановлено також, що механізми кристалізації на частинках наповнювача суттєво відрізняються для композитів, отриманих різними методами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические свойства полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната. Промышленная теплотехника. 2015. №2. С. 12-18.
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. С. 49-59.
3. 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.
4. Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Навродская Р.А. Теплопроводность по-

Таблиця 3. Параметри структуроутворення на стадії кристалізації в об'ємі полімерних мікрокомполімерів на основі поліетилену, наповнених мікрочастинками алюмінію, при різних методах їх отримання.

ω , %	V_r , К / с	Рівняння (2)			Рівняння (3)				
		n	$K_n, 10^{-5} \text{ К}^{-n}$	$\chi^2, 10^{-5}$	f	$K'_n, 10^{-5} \text{ К}^{-n'}$	n''	$K''_n, 10^{-5} \text{ К}^{-n''}$	$\chi^2, 10^{-5}$
Метод I									
0,2	0,00833	3,2	163	88	0,77	98	3,0	339	1
	0,0333	3,1	177	77	0,75	92	3,0	329	3
	0,0833	3,2	189	95	0,74	101	3,2	323	5
	0,333	3,3	198	96	0,75	103	3,1	295	4
1,0	0,00833	3,2	175	86	0,76	89	3,0	148	4
	0,0333	3,0	186	78	0,75	68	2,9	174	3
	0,0833	3,2	203	76	0,76	69	3,0	203	6
	0,333	3,1	259	84	0,74	97	2,9	279	3
4,0	0,00833	3,1	184	92	0,75	85	3,1	154	5
	0,0333	3,1	192	84	0,74	94	3,0	164	2
	0,0833	3,0	213	79	0,79	91	3,0	189	6
	0,333	3,1	234	87	0,78	84	3,1	243	3
Метод II									
0,2	0,00833	3,1	158	97	0,74	89	3,0	306	1
	0,0333	3,3	149	85	0,75	69	3,1	282	3
	0,0833	3,1	190	78	0,76	91	3,0	240	2
	0,333	3,0	204	86	0,74	82	2,9	219	5
1,0	0,00833	3,1	175	92	0,75	95	2,1	152	2
	0,0333	3,0	195	86	0,76	82	2,2	169	1
	0,0833	3,0	203	84	0,77	80	2,0	200	2
	0,333	3,2	334	95	0,76	79	2,1	238	6
4,0	0,00833	3,2	179	87	0,75	79	2,1	164	2
	0,0333	3,2	197	85	0,75	77	2,0	162	3
	0,0833	3,1	200	94	0,78	72	2,0	152	2
	0,333	3,2	352	92	0,74	84	1,9	145	4

лімерних мікро- і нанокомполімерів на основі поліетилену при різних методах їх отримання. Промышленная теплотехника. 2017. №4. С. 21-25.

5. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические свойства низкотемпературных полимерных нанокомполімерів для элементов энергетического оборудования. Промышленная теплотехника. 2015. №6. С. 5-14.

6. Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lysenkov E.A. Analysis of thermal conductivity of polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes and carbon black. Journal of Nanoscience and Electronic Physics. 2014. V. 6. No. 1. P. 01015-1 - 01015-6.

7. Фиалко Н.М., Навродская Р.О., Динжос Р.В., Меранова Н.О., Шевчук С. І. Ефективність використання

полімерних мікро- і нанокомполімерів для теплообмінних апаратів газо-газового типу. Промышленная теплотехника. 2017. №5. С. 12-18.

8. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Структурообразование полимерных микро- и нанокомполімерів на основе поликарбоната в процессах их кристаллизации. Промышленная теплотехника. 2015. №3. С. 5-15.

9. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности полимерных микро- и нанокомпозиционных материалов. Промышленная теплотехника. 2016. №1. С. 5-14.

10. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилиза-

ционных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника. 2014. № 4. С.27-36.

11. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.А., Навродская Р.А.* Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 90-93.

12. *Зимин Л.Б., Фиалко Н.М.* Анализ эффективности теплонасосных систем утилизации теплоты канализационных стоков для теплоснабжения социальных объектов. Промышленная теплотехника. 2008. №1. С. 77-85.

13. *Фиалко Н.М., Аронов И.З., Навродская Р.А., Пресич Г.А.* Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения. Промышленная теплотехника. 2003. №3. С. 36-41.

14. *Фиалко Н.М., Зимин Л.Б., Дубовской С.В.* Утилизация энергии выбросов систем местной вентиляции метрополитенов с помощью тепловых насосов. Промышленная теплотехника. 2000. №1. С. 90-93.

15. *Фиалко Н.М., Гомон В.И., Навродская Р.А., Прокопов В.Г., Пресич Г.А.* Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа. Промышленная теплотехника. 2000. №2. С. 49-53.

THE CRYSTALLIZATION REGULARITY OF POLYMER MICROCOMPOSITE MATERIALS IN DIFFERENT METHODS OF THEIR PREPARATION

Fialko N.M.¹, Dinzhos R.V.², Navrodsкая R.O.¹, Meranova N.O.¹, Sherenkovskiy Ju.V.¹

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

² Nikolaev National University, named after V.A. Sukhomlinskiy, 24, Nikolska str., Mykolaev, 540030, Ukraine

Reference 15, tabl. 3, figure 1.

Keywords: polymer microcomposites, aluminum micro-particles, structure formation, crystallization exotherms.

1. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Teplofizicheskiye svoystva polimernykh mikro- i nanokompozitov na osnove polikarbonata. [Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate]. Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering]. 2015. 37(2). P. 12-18. [Rus]

2. *Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Vliyaniye tipa polimernoy matritsy na teplofizicheskiye svoystva i strukturoobrazovaniye polimernykh nanokompozitov. [The influence of the type of polymer matrix on the thermophysical properties and the structure formation of polymeric nanocomposites]. Tekhnologicheskie sistemy. [Technological systems]. 2016. 38(3). P. 49-59. [Rus]

3. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Teplofizicheskiye kharakteristiki vysokoteploprovodnykh polimernykh mikro- i nanokompozitov. [Thermophysical characteristics of highly heat-conducting polymeric micro- and nanocomposites]. Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering]. 2015. 37(5). P. 5-15. [Rus]

4. *Fialko N.M., Dinzhos R.V., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Navrodsкая R.A.* Teploprovodnost polimernykh mikro- i nanokompozitov na osnove polietilena pri razlichnykh metodakh ikh polucheniya [Heat conductivity of polymeric micro- and nanocomposites based on polyethylene at various methods of their preparation]. Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering]. 2017.39(4). P. 21-25. [Rus]

5. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Teplofizicheskiye svoystva nizkoteploprovodnykh polimernykh nanokompozitov dlya elementov

- energeticheskogo oborudovaniya. [Thermophysical properties of low-conductivity polymer nanocomposites for energy equipment elements]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2015. 37(6). P. 5-14. [Rus]
6. *Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lysenkov E.A.* Analysis of thermal conductivity of polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes and carbon black. *Journal of Nanoscience and Electronic Physics*. 2014. V. 6. No. 1. P. 01015-1 - 01015-6.
7. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Dinzhos R.V., Meranova N.O., Shevchuk S.I.* Effektivnost ispol'zovaniya polimernykh mikro- i nanokompozitov dlya teploobmennykh apparatov gazo-gazovogo tipa [Efficiency of polymer micro and nanocomposites for heat-exchange gas-gas type devices]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2017. 39(5). P. 12-19. [Ukr]
8. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Strukturnoobrazovaniye polimernykh mikro- i nanokompozitov na osnove polikarbonata v protsessakh ikh kristallizatsii. [Structurization of polymeric micro- and nanocomposites based on polycarbonate in the processes of their crystallization]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2015. № 3. P. 5-15. [Rus]
9. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodsкая R.A.* Temperaturnyye zavisimosti koeffitsiyentov teploprovodnosti polimernykh mikro- i nanokompozitsionnykh materialov [Temperature dependences of the thermal conductivity coefficients of polymeric micro- and nanocomposite materials]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2016. 38(1). P. 5-15. [Rus]
10. *Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Navrodsкая R.A., Gnedash G.A.* Osnovnyye printsipy sozdaniya teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlya kotelnykh maloy energetiki [Basic principles of heat recovery technologies for boilers of the low thermal power]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2014. 36(4). 27-35. (Rus.)
11. *Fialko N.M., Stepanova A.I., Presich G.A., Navrodsкая R.A.* Termodinamicheskaya optimizatsiya i analiz effektivnosti teploutilizatsionnykh sistem kotel'nykh agregatov. [Thermodynamic optimization and analysis of efficiency of heat recovery systems of boiler units]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2012. 34(1). P. 90-93. (Rus.)
12. *Zimin L.B., Fialko N.M.* Analiz effektivnosti teplonasosnykh sistem utilizatsii teploty kanalizatsionnykh stokov dlia teplosnabzheniya sotsialnykh obektov [Analysis of the effectiveness of heat pump systems of sewage runoff heat recovery for social facilities heat supply]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2008. 30(1). 77-85. (Rus.)
13. *Fialko N.M., Aronov I.Z., Navrodsкая R.A., Presich G. A.* Effektivnost primeneniya kondensatsionnykh teploutilizatorov v sistemakh teplosnabzheniya [The efficacy of the condensing heat exchanger in heat supply systems]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2003. 25(3), 36-41. (Rus.)
14. *Fialko, N.M., Zimin, L.B., Dubovskoy, S.V.* Utilizatsiya energii vybrosov sistem mestnoy ventilyatsii metropolitenov s pomoshchyu teplovykh nasosov [Utilization of energy emissions of local ventilation systems of subways using heat pumps]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2000. 22(1). P. 90-93. (Rus.)
15. *Fialko N.M., Gomon V.I., Navrodsкая R.A., Prokopov V.G., Presich G.A.* Osobennosti metodiki rascheta poverkhnostnykh teploutilizatorov kondensatsionnogo tipa. [Specifics of the calculation procedure for surface heat exchangers of condensation type], *Promyshlennaya teplotekhnika*. [Industrial Heat Engineering]. 2000. 22(2). P. 49-53. (Rus.)

Отримано 17.05.2018

Received 17.05.2018