

DOI 10.15589/jnn20150206

УДК 536.6: 536.7

Д46

ANALYSIS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYPROPYLENEАНАЛІЗ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ
НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІПРОПІЛЕНУ**Roman V. Dinzhos**

dinzhos@mail.ru

ORCID 0000-0003-1105-2642

Nataliia M. Fialko

nmfialko@ukr.net

ORCID 0000-0003-0116-7673

Mykola A. Rehteta

rehteta@mdu.edu.ua

ORCID 0000-0001-7234-6594

Volodymyr M. Makhrovskiy

vnmnik@gmail.com

ORCID 0000-0002-4109-3077

Р. В. Дінжос,канд. фіз.-мат. наук, доц.¹**Н. М. Фіалко,**чл.-кор. НАНУ, д-р., техн. наук, проф.²**М. А. Рехтета,**канд. фіз.-мат. наук, доц.¹**В. М. Махровський,**канд. фіз.-мат. наук, доц.¹¹*Mykolaiv State University named after V. Sukhomlinsky, Mykolaiv*²*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv*¹*Миколаївський національний університет ім. В. О. Сухомлинського, м. Миколаїв*²*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ*

Abstract. Polymer nanocomposites (PNC) as a new class of materials is the object of intensive research during the last decade. The growth of interest in the study of these systems is explained by their better mechanical durability and higher thermal stability in comparison with the unfilled polymers. The improvement of the characteristics of the polymer takes place already at the insertion of a small amount of filler (~ 1 – 5 %) in it. The main advantages of these materials are light weight, corrosion resistance, ease of treatment, cheap filler etc. Nowadays, the majority of the heat power complex products are manufactured on the basis of polymer composite materials (PCM) which contain microparticles. The use of the nanofillers allows developing a PCM with the same set of functional characteristics that the PCM with micro particles has, but at the lower filler content.

Polymer nanocomposites (PNC) are not only of practical interest, but also of a fundamental one, as nanofillers have a greater specific surface area which polymer chains interact. Therefore, the main studies in this direction have recently been focused on the improvement of synthesis methods and characterization of physical properties of polymer nanocomposites. Carbon nanotubes (CNT) are of considerable interest for many technologies. CNT have high elasticity, strength and stringiness, so that they can be used in a wide variety of nanocomposites, including the polymer ones. One of the most important factors of the effective improvement of the polymer properties is the insertion of carbon nanotubes which have large specific surface area, that promotes better adhesion with the polymer matrix, in comparison with conventional polymer composites. Polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes can be easily made due to the small diameter of the filler. The use of carbon nanotubes as a filler provides wide possibilities for the development of new multifunctional materials with a wide range of applications in industry. Currently, there is no systematic information on the impact of carbon nanotubes on the processes of structure formation of polymer composites and thermal properties of polymer nanocomposites obtained on their basis. Considering the above mentioned, the study of the impact of carbon nanotubes on the structure and thermal properties of the composites on their basis is urgent.

Keywords: polypropylene/carbon nanotube; nanocomposite; non-isothermal crystallization; crystallization enthalpy; crystallization temperature.

Аноація. Представлено результати експериментальних і розрахункових досліджень кінетики неізотермічної кристалізації ізотактичного поліпропілену (ПП-0) і наноккомпозитів, які містять 0,5 (ПП-0,5); 1 (ПП-1); 2 (ПП-2); 5 (ПП-5); 10 (ПП-10); 20 (ПП-20) мас. % вуглецевих нанотрубок. Виконано аналіз термодинамічних параметрів залежно від процентного вмісту вуглецевих нанотрубок. Вивчено особливості впливу структури полімерних наноккомпозитів на їх теплофізичні властивості.

Ключові слова: поліпропілен/вуглецеві нанотрубки; нанокомпозит; неізотермічна кристалізація; ентальпія кристалізації; температура кристалізації.

Аннотація. Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований кинетики неизо-термической кристаллизации изотактического полипропилена (ПП-0) и нанокомпозитов, которые содержат 0,5 (ПП-0,5); 1 (ПП-1); 2 (ПП-2); 5 (ПП-5); 10 (ПП-10); 20 (ПП-20) мас. % углеродных нанотрубок. Выполнен анализ термодинамических параметров в зависимости от процентного содержания углеродных нанотрубок. Изучены особенности влияния структуры полимерных нанокомпозитов на их теплофизические свойства.

Ключевые слова: полипропилен/углеродные нанотрубки; нанокомпозит; неизо-термическая кристаллизация; энтальпия кристаллизации; температура кристаллизации.

REFERENCES

- [1] Malezhik A. V., Sementsov Yu. I., Yanchenko V. V. Sintez uglerodnykh nanotrubok metodom kataliticheskogo razlozheniya [Synthesis of carbon nanotubes by catalytic decomposition]. *Zhurnal prikladnoy khimii — Russian Journal of Applied Chemistry*, 2005, no. 78, pp. 938–943.
- [2] Lysenkov E. A., Homza Yu. P., Davydenko V. V., Klepko V. V. Struktura ta teplofizychni vlastyvoli system na osnovi olihoetylenhlikoliu ta anizometrychnykh nanonapovniuvachiv [The structure and thermal properties of systems based on oligoethylene glycol and anisometric nanofillers]. *Polimernyi zhurnal — Polymer Journal*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 99–104.
- [3] Baughman R. H., Zakhidov A. A., Heer W. A. Carbon Nanotubes — the Route Toward Applications. *Science*, 2002, Vol. 297, pp. 787–792.
- [4] Dinzhos R. V., Privalko V. P., Privalko E. G. Enthalpy relaxation in the cooling/heating cycles of polypropylene/organosilica nanocomposites. I. Non-isothermal crystallization. *Thermochimica Acta*, 2005, Vol. 428, pp. 76–82.
- [5] Elmahdy M. M., Chrissopoulou K., Afratis A., Floudas G., Anastasiadis S. H. Effect of Confinement on Polymer Segmental Motion and Ion Mobility in PEO/Layered Silicate Nanocomposites. *Macromolecules*, 2006, Vol. 39, pp. 5170–5173.
- [6] Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review. *Prog Polym Sci*, 2011, Vol. 36, pp. 914–944.
- [7] Inyang H. I., Bae S., Mbamalu G., Sang-Won Park. Aqueous Polymer Effects on Volumetric Swelling of Na-Montmorillonite. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2007, Vol. 19, pp. 84–90.
- [8] Loiseau A., Tassin J. F. Model Nanocomposites Based on Laponite and Poly(ethylene oxide): Preparation and Rheology. *Macromolecules*, 2006, Vol. 39, pp. 9185–9191.
- [9] Lourie O., Cox D. M., Wagner H. D. Buckling and Collapse of Embedded Carbon Nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, Vol. 81, pp. 1638–1641.
- [10] Qian D., Dickey E. C., Andrews R., Rantell T. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, Vol. 76, pp. 2868–2870.
- [11] Qiu W. L., Pyda M., Nowak-Pyda E., Habenschuss A., Wunderlich B. Crystallization and Melting of a Branched Polyethylene with Precisely Controlled Chemical Structure. *Journal of Polymer Science*, 2006, pp. 3461–3474.
- [12] Stauffer D., Aharony A. *Introduction to percolation theory*. London, Taylor and Francis Publ., 1994. 318 p.
- [13] Stefanescu E. A., Stefanescu C., Negulescu I. I., Daly W. H. Effect of Ionic Species on the Structures and Properties of Salt-Containing PEO/ Montmorillonite Nanocomposites. *Macromolecules*, 2008, Vol. 209, pp. 2320–2330.
- [14] Su Yong Kwon, Min Kwon, Yong-Gyoo Kim, Sanghyun Lee, Young-Soo Seo. A large increase in the thermal conductivity of carbon nanotube/polymer composites produced by percolation phenomena. *Carbon*, 2013, Vol. 55, pp. 285–290.
- [15] Wunderlich B. *Crystal Melting (Macromolecular Physics, vol. 3)*. New York, Academic Press Publ., 1980. 648 p.
- [16] Yao N., Lordia V., Maa S. X. C., Dujardina E., Krishnana, M. M. J. Treacy A., Ebbesena T. W. Structure and Oxidation Patterns of Carbon Nanotubes. *Journal of Materials Research*, 1998, Vol. 13, pp. 2432–2437.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Полімерні наноккомпозити (ПНК), як новий клас матеріалів, є об'єктами інтенсивних досліджень протягом останнього десятиліття [5, 6, 14]. Зростання інтересу до вивчення даних систем пояснюється тим, що вони мають кращу механічну стійкість і високу термостабільність порівняно з ненаповненими полімерами. Поліпшення характеристик полімеру відбувається вже при введенні малої кількості наповнювача (~1–5%) [7, 8]. Основні переваги таких матеріалів — мала вага, стійкість до корозії, легкість обробки тощо. На сьогодні більшість виробів теплоенергетичного комплексу створюється на основі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які містять мікророзмірні частинки. Використання наноаповнювачів дозволяє створити ПКМ з таким же комплексом функціональних характеристик, як і ПКМ з мікророзмірними частинками, але за меншого вмісту наповнювача.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ І ДОСЛІДЖЕНЬ

Полімерні наноккомпозити (ПНК) викликають не тільки практичний інтерес, а й фундаментальний, оскільки нанорозмірні наповнювачі мають більшу питому поверхню, з якою взаємодіють полімерні ланцюги. Основні дослідження в цьому аспекті протягом останнього часу були спрямовані на удосконалення методів синтезу і характеристику фізичних властивостей полімерних наноккомпозитів [7, 8, 11, 13]. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) становлять значний інтерес для багатьох технологій [3]. ВНТ характеризуються значною еластичністю, міцністю і пружністю, що дозволяє використовувати їх у складі різноманітних наноккомпозитів, у тому числі й полімерних. Одним з важливих чинників ефективного поліпшення властивостей полімеру є введення ВНТ, які мають велику питому площу поверхні, що сприяє кращій адгезії з полімерною матрицею [10] порівняно з традиційними полімерними композитами. Полімерні наноккомпозити, які наповнені ВНТ, легко готуються завдяки малому діаметру наповнювача [16]. Використання ВНТ як наповнювача створює значні можливості для розробки нових багатофункціональних матеріалів з широким спектром застосувань у промисловості [9]. На даний час відсутня системна інформація про вплив ВНТ на процеси структуроутворення полімерних композитів і теплофізичні властивості полімерних наноккомпозитів, отриманих на їх основі. Зважаючи на викладене, актуальними є дослідження впливу ВНТ на структуру й теплофізичні властивості композитів на їх основі.

МЕТА СТАТТІ — встановити природу впливу наноаповнювача на механізм і кінетику структуроутворення ПНК, які містять ВНТ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У процесі проведення досліджень використований ізотактичний поліпропілен і наноккомпозит, що містить 0,5; 1; 2; 5; 10 і 20 мас. % ВНТ (виробник ВАТ «Спецмаш» (Україна)), виготовлених методом CVD з етилену (англ. Chemical vapor deposition — хімічне парофазне осадження) [1]. Зміст мінеральних домішок складає ~0,1%. Питома площа поверхні S ВНТ, визначена адсорбцією N_2 , становить $190 \text{ м}^2/\text{г}$. Зовнішній діаметр ВНТ, розрахований за допомогою методу малокутового розсіювання рентгенівських променів, складає 20 нм, довжина — 1...5 мкм, товщина стінок ~5 нм. Питома провідність σ ВНТ в порошкоподібному стані, стислих за 15 ТПА, становить 10 см/см вздовж осі стиснення. Отримано шість наноккомпозитів з 0,5; 1; 2; 5; 10 і 20 масовим процентним вмістом ВНТ методом ультразвукового змішування в розчині.

Зміна ентальпії в процесі охолодження й подальшого нагрівання визначалася в сухій атмосфері азоту методом диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) на установці Перкіна-Елмера DSC-2 з модернізованим програмним забезпеченням від IFA GmbH Ulm. Кожен зразок утримувався протягом 3-х хвилин за температури 490 К, що перевищує температуру плавлення полімеру на 50 К, і далі охолоджувався до 360 К в умовах реалізації однієї з п'яти постійних швидкостей охолодження (від 20 К/хв до 1,0 К/хв).

Спочатку розглянемо результати експериментальних і розрахункових досліджень, що стосуються процесу нуклеації кристалів. На рис. 1. наведено експериментальні екзотермії кристалізації для поліпропілену (ПП-0) й композиту на основі поліпропілену з масовим вмістом наповнення ВНТ, що дорівнює 20% (ПП-20). Хоч загальний вигляд термограм виявився подібним, але максимумами характеристичних піків зміщені по осі температур і різні за амплітудою. Як видно з рис. 1, значення температур початку кристалізації T_N і температур T_{\max} , що відповідають максимальній швидкості кристалізації, зменшуються з ростом швидкості охолодження. При менших швидкостях охолодження збільшується ймовірність зайняття енергетично більш вигідного положення ламелями поліпропілену.

Температуру закінчення процесу кристалізації T_F визначали як точку повернення термограми на базову лінію, питому ентальпію кристалізації H_k — як площу піка, обмеженого температурами T_N і T_F (табл. 1) [4, 15].

З табл. 1 і рис. 2. видно, що значення температур початку кристалізації T_N і температур T_{\max} , які відповідають максимальній швидкості кристалізації, зростають зі збільшенням процентного вмісту ВНТ (рис. 2), що, у свою чергу, призводить, до збільшення кількості центрів зародкоутворення. Різке зростання температури T_{\max} (температура максимальної

швидкості кристалізації) пов'язане з тим, що в початковий момент відстані між ВНТ були на багато більші, ніж розміри нанотрубок (за вмісту ВНТ $\phi \leq 1\%$). У даному випадку ВНТ сприяли кристалізації поліпропілену, збільшуючи швидкість кристалізації.

За процентного вмісту ВНТ $\phi > 1\%$ утворюється «нескінченний» кластер, який починає відігравати роль стеричної перешкоди для впорядкованих областей, які формуються в поліпропілені. За подальшого збільшення вмісту ВНТ ($\phi > 2\%$) відбувається процес налипання ВНТ, як наслідок, зменшуються поверхнева енергія ВНТ і швидкість кристалізації. За вмісту ВНТ $\phi > 5\%$ нанотрубки утворюють агломерати більших просторових розмірів,

що призводить до поступового незначного росту швидкості кристалізації (рис. 2).

Аналогічна ситуація спостерігається для ентальпії кристалізації (рис. 3) для згаданих вище систем. Екстремальне значення графіка залежності ентальпії кристалізації від відсоткового вмісту ВНТ коливається в межах від 0,5% до 2%. Дану поведінку можна пояснити вирішальним впливом поверхні нанотрубок на ентальпію плавлення, а отже, і ступінь кристалічності полімерної матриці.

За малого вмісту ВНТ ($< 0,5\%$) наявність розвинутої поверхні наповнювачів ускладнює процеси теплового руху молекул і, тим самим, впливає на здатність матриці до кристалізації. За цих умов

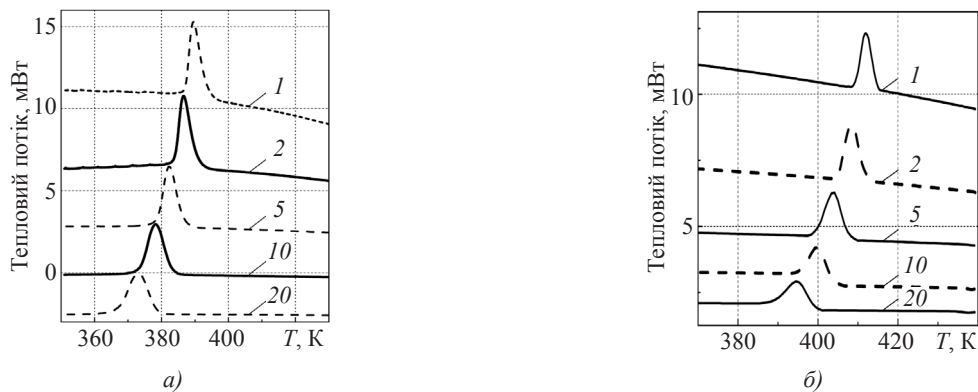


Рис. 1. Екзотерми кристалізації для ПП-0 (а) и ПП-20 (б) при різних значеннях швидкостей охолодження: 1 — $\bar{v}_t = 1$; 2 — $\bar{v}_t = 2$; 3 — $\bar{v}_t = 5$; 4 — $\bar{v}_t = 10$; 5 — $\bar{v}_t = 20$ К/хв.

Таблиця 1. Теплофізичні параметри процесу кристалізації

Зразок	T_N	T_{max}	H_k , Дж/г	Зразок	T_N	T_{max}	H_k , Дж/г
$\bar{v}_t = 1$ К/хв			$\bar{v}_t = 20$ К/хв				
ПП	398,0	390,8	122,3	ПП	380,0	372,0	117,4
ПП-0,5	402,5	400,0	74,2	ПП-0,5	392,3	387,8	71,6
ПП-1	398,3	395,8	72,3	ПП-1	387,4	382,4	68,5
ПП-2	400,0	397,5	72,6	ПП-2	388,2	382,4	64,4
ПП-5	402,5	400,0	70,1	ПП-5	392,3	386,5	65,6
ПП-10	402,5	399,2	64,7	ПП-10	391,9	385,7	64,1
ПП-20	414,7	411,3	61,6	ПП-20	401,1	394,5	52,3

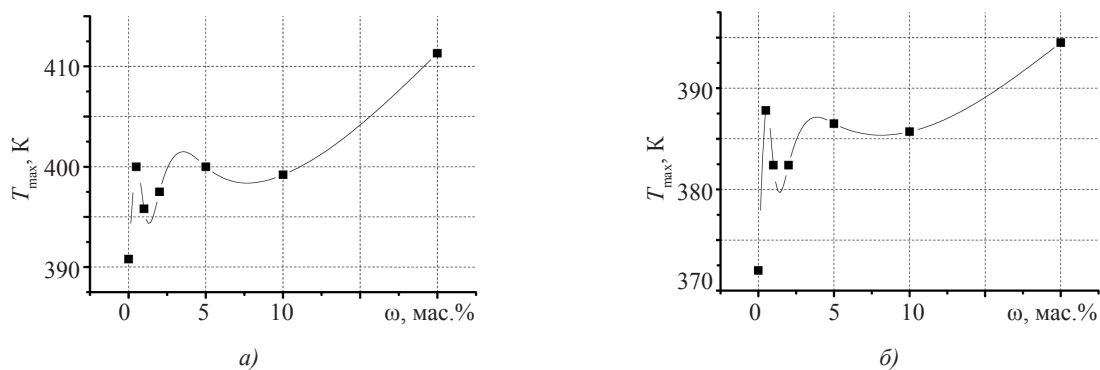


Рис. 2. Залежність температури кристалізації (T_{max}) від відсоткового вмісту вуглецевих нанотрубок у поліпропілені при швидкості охолодження: а) — $\bar{v}_t = 1$ К/хв; б) — $\bar{v}_t = 20$ К/хв.

завдяки стеричним перешкодам, які створює розвинена поверхня ВНТ, макромолекули не здатні до утворення щільної кристалічної структури. Отже, введення до складу кристалічного полімеру наповнювача з розвинутою поверхнею призводить до зниження ступеня кристалічності матриці. Біля поверхні нано-наповнювача утворюється аморфний міжфазний шар, енергія активації макромолекул у якому набагато менша, ніж у кристалічній фазі полімеру. При досягненні порога перколяції ($\approx 1\%$) спостерігається мінімальний ступінь кристалічності матриці. Відомо, що найбільша поверхня нанотрубок у системах на основі поліетеру, спостерігається в околі порога перколяції [2], чим і пояснюється мінімум на рис. 3. При концентраціях наповнювача більших ніж 2% ВНТ починають утворювати агрегати (можливо, не змочені матрицею), що призводить до зменшення поверхні наповнювача, яка здатна до взаємодії з матрицею. З ростом концентрації наповнювача вище за величину порога перколяції ентальпія плавлення нанокомпозитів майже не змінюється, що пояснюється ущільненням ВНТ в агрегатах. Така залежність теплофізичних характеристик вказує на дуже високий ступінь агрегації ВНТ і, як наслідок, зменшення поверхні розподілу матриця — наповнювач [12].

Розглянемо результати експериментальних і розрахункових досліджень із кристалізації в об'ємі

матеріалу, для чого проаналізуємо процес кристалізації поліпропілену (рис. 1) в межах рівняння Колмогорова-Аврамі [15]:

$$\alpha_c(\tau) = 1 - \exp[-K_n \tau^n], \quad (1)$$

де $\alpha_c(\tau)$ — об'ємна частка розплаву, яка перейшла у кристал за зведений час τ , K_n — ефективна константа швидкості, n — безрозмірний параметр форми.

За результатами обробки експериментальних даних за рівнянням (1) розраховували час, за який процес кристалізації в зразках протікав на 50% $\alpha_c(\alpha_{0,5})$, яким переважно характеризують швидкість процесу кристалізації (період напівкристалізації) (табл. 2).

З таблиці 2 і рис. 4 простежується чітка закономірність, за якої період напівкристалізації спочатку монотонно убуває, досягає мінімуму при концентрації ВНТ 1%, а потім зростає зі збільшенням вмісту наповнювача.

Дану поведінку можна також пояснити впливом поверхні ВНТ на швидкість кристалізації. За малого вмісту ВНТ ($<1\%$) питома поверхня наповнювачів зростає і виникають локальні області переохолодження, що призводить до зростання швидкості кристалізації. При досягненні порога перколяції ($\varphi=1\%$) спостерігається мінімальне значення періоду напівкристалізації й максимальна швидкість кристалізації.

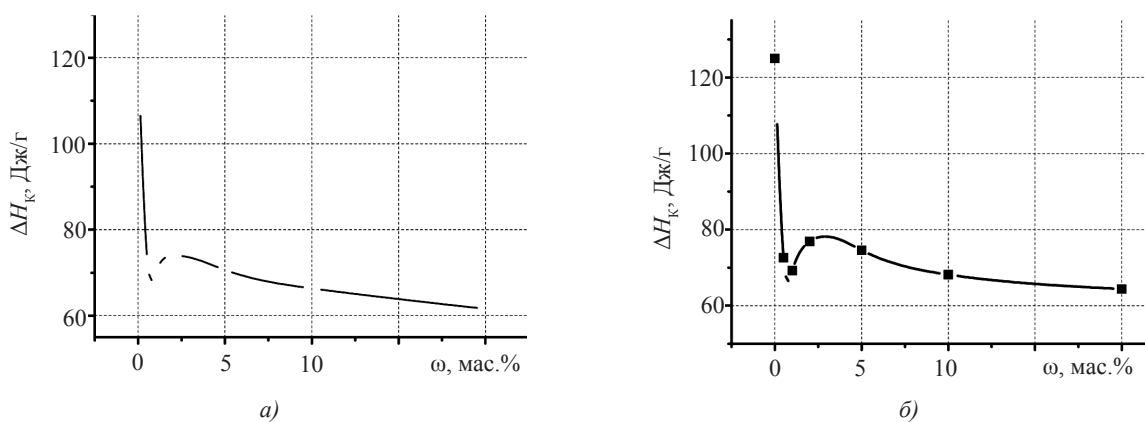


Рис. 3. Залежність ентальпії кристалізації від відсоткового вмісту вуглецевих нанотрубок у поліпропілені при швидкості охолодження: а) $\bar{v}_l = 1$ К/хв ; б) $\bar{v}_l = 5$ К/хв.

Таблиця 2. Період напівкристалізації

Зразок	Швидкість охолодження \bar{v}_l , К/хв				
	1	2	5	10	20
	$\theta_{0,5}$, сек.				
ПП-0	354	177	145	75,0	52,2
ПП-0,5	204	160	90,0	66,0	46,3
ПП-1	192	108	68,4	18,9	10,2
ПП-2	236	171	88,8	44,4	12,0
ПП-5	252	129	76,8	21,6	15,6
ПП-10	313	150	85,0	56,5	18,6
ПП-20	558	180	99,6	60,0	47,7

ВИСНОВКИ. У даній роботі показано, що частинки ВНТ є активним нуклеаційним агентом для кристалізації поліпропілену. При охолодженні НК з розплаву завдяки власній високій теплопровідності ВНТ на поверхні виникає локальне переохолодження, що призводить до росту швидкості кристалізації.

Встановлено, що за вмісту $\omega \sim 1\%$ ВНТ ентальпія кристалізації набуває найменшого значення; це пов'язано з наявністю розвинутої поверхні наповнювача, що, в свою чергу, стимулює утворення впорядкованих областей з меншою енергією.

Отримано, що найбільша швидкість кристалізації полімерних композиційних матеріалів належить ПП-1, оскільки питома поверхня наповнювача має найбільше значення.

Сукупність отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що при кристалізації ПНК на фоні конкуруючих процесів нуклеації (процесу кристалізації й гальмування кристалізації частинками

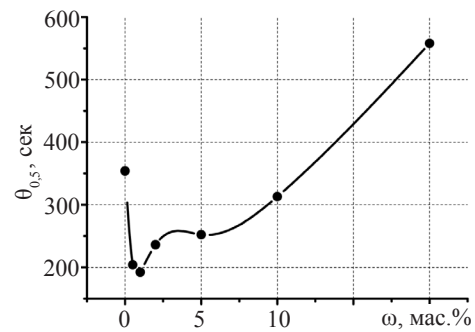


Рис. 4. Залежність періоду напівкристалізації від процентного вмісту вуглецевих нанотрубок в поліпропілені при швидкості охолодження $\bar{v}_l = 1$ К/хв.

нано наповнювача) при вмісті ВНТ (1–2) мас. % виникають за принципом мінімуму енергії енергетично оптимальні умови для кристалізації полімерної матриці в ПНК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Малежик, А. В.** Синтез углеродных нанотрубок методом каталитического разложения [Текст] / А. В. Малежик, Ю. И. Семенов, В. В. Янченко // Журнал прикладной химии. — 2005. — № 78. — С. 938–943.
- [2] Структура та теплофізичні властивості систем на основі олігоетиленгліколю та анізотричних нано наповнювачів [Текст] / Е. А. Лисенков, Ю. П. Гомза, В. В. Давиденко, В. В. Клепко // Полімерний журнал. — 2010. — Т. 32, № 2. — С. 99–104.
- [3] **Baughman, R. H.** Carbon Nanotubes — the Route Toward Applications [Text] / R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. Heer / Science. — 2002. — Vol. 297. — P. 787–792.
- [4] **Dinzhos, R. V.** Enthalpy relaxation in the cooling/heating cycles of polypropylene / organosilica nanocomposites. I. Non-isothermal crystallization [Text] / R. V. Dinzhos, V. P. Privalko, E. G. Privalko / Thermochimica Acta. — 2005. — Vol. 428. — P. 76–82.
- [5] **Elmahdy, M. M.** Effect of Confinement on Polymer Segmental Motion and Ion Mobility in PEO / Layered Silicate Nanocomposites [Text] / M. M. Elmahdy, K. Chrissopoulou, A. Afratis, G. Floudas, S. H. Anastasiadis / Macromolecules. — 2006. — Vol. 39. — P. 5170–5173.
- [6] **Han, Z.** Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review [Text] / Z. Han, A. Fina. — Prog Polym Sci. — 2011. — Vol. 36. — P. 914–944.
- [7] **Inyang, H. I.** Aqueous Polymer Effects on Volumetric Swelling of Na-Montmorillonite [Text] / H. I. Inyang, S. Bae, G. Mbamalu, Sang-Won Park / J. Mater. Civ. Eng. — 2007. — Vol. 19. — P. 84–90.
- [8] **Loiseau, A.** Model Nanocomposites Based on Laponite and Poly(ethylene oxide): Preparation and Rheology [Text] / A. Loiseau and J. F. Tassin / Macromolecules. — 2006. — Vol. 39. — P. 9185–9191.
- [9] **Lourie, O.** Buckling and Collapse of Embedded Carbon Nanotubes [Text] / O. Lourie, D. M. Cox, H. D. Wagner / Phys. Rev. Lett. — 1998. — Vol. 81. — P. 1638–1641.
- [10] **Qian, D.** Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites [Text] / D. Qian, E. C. Dickey, R. Andrews, T. Rantell / Appl. Phys. Lett. — 2000. — Vol. 76. — P. 2868–2870.
- [11] **Qiu, W. L.** Crystallization and Melting of a Branched Polyethylene with Precisely Controlled Chemical Structure [Text] / W. L. Qiu, M. Pyda, E. Nowak-Pyda, A. Habenschuss, and B. Wunderlich / Journal of Polymer Science. — 2006. — P. 3461–3474.
- [12] **Stauffer, D.** Introduction to percolation theory [Text] / D. Stauffer, A. Aharony. — London: Taylor and Francis, 1994. — 318 p.
- [13] **Stefanescu, E. A.** Effect of Ionic Species on the Structures and Properties of Salt-Containing PEO/Montmorillonite Nanocomposites [Text] / E. A. Stefanescu, C. Stefanescu, I. I. Negulescu, W. H. Daly / Macromolecules. — 2008. — Vol. 209. — P. 2320–2330.

- [14] **Su Yong Kwon.** A large increase in the thermal conductivity of carbon nanotube/polymer composites produced by percolation phenomena [Text] / Su Yong Kwon, Min Kwon, Yong-Gyoo Kim, Sanghyun Lee, Young-Soo Seo / Carbon. — 2013. — Vol. 55. — P. 285–290.
- [15] **Wunderlich, B.** Crystal Melting [Text] / Macromolecular Physics. — Vol. 3. — New York : Academic Press — 1980. — 648 p.
- [15] **Yaoa, N.** Structure and Oxidation Patterns of Carbon Nanotubes [Text] / N. Yaoa, V. Lordia, S.X.C. Маа, E. Dujardina, A. Krishnana, M.M.J. Treacya, T.W. Ebbesena / Journal of Materials Research. — 1998. — Vol. 13. — P. 2432–2437.

© Р. В. Дінжос, Н. М. Фіалко, М. А. Рехтета, В. М. Махровський

Надійшла до редколегії 02.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Є. Т. Бурдун*