

KINETICS OF NON-ISOTHERMAL CRYSTALLIZATION
OF THE POLYETHYLENE/POLYCARBONATE COMPOSITIONКИНЕТИКА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
КОМПОЗИЦИИ ПОЛИЭТИЛЕН/ПОЛИКАРБОНАТ**Roman V. Dinzhos**dinzhos@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1105-2642

Nataliia M. Fialkonmfialko@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0116-7673

Eduard A. Lysenkovealisenkov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1369-4609

Mykola A. Rekhetarekheta@mdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7234-6594

Р. В. Динжос,канд. физ.-мат. наук, доц.¹;**Н. М. Фялко,**чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.²;**Э. А. Лысенков,**канд. физ.-мат. наук¹;**М. А. Рехета,**канд. физ.-мат. наук, доц.¹¹Vasyl Sykhomlynskyi Mykolaiv National University, Mykolaiv,²Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv¹Николаевский государственный университет им. В.А.Сухомлинского, г. Николаев²Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

Abstract. The study of the structure has showed that with the increase in the amount of amorphous polymer, the spherulite structure is forming less distinctly; the boundaries between the spherulites are blurred, the connectivity between the spherulites is increasing [9]. The decrease in the average size of the energetic crystal regions was also noted in the [10] work. However, the kinetics of the non-isothermal crystallization of the composition which gives the important information about the processes of the structure formation has not been studied. The aim of the work is the study of the peculiarities of the impact of the initial polymers concentration on the kinetics of the crystallization of the polymer composition. The samples of the binary PE/PC composition in different percentages were selected as the model samples of the study. The powders of the ingoing materials were dried at $T = 313$ K with the following mechanical mixing. The processing of the studied polymers was carried out with the hot pressing method at atmospheric pressure. The samples were heated up to $T = 453$ K, held for 10 minutes at the constant temperature with the following by the quite slow (2 K/min) cooling of the melt to the room temperature. Thus, analyzing the parameters of the crystal formation obtained from the crystallization exotherms, the increase in the crystallization barrier of the PE lamellar crystallization was stated. At the same time, the values of K_m are lower, probably due to the constraints of the PE segments transport across the melt/crystal interface. The analysis of the oscillation of the n shape parameter showed that in most cases, the mechanism of the crystal growth is predominantly spherical. However, when the PC content in the composition is 90 % (with PE is 10 %) there is a change from the spherical crystal growth mechanism to the disk-like one, indicating the interaction of two polymer matrices.

Keywords: polymer composite; crystal formation parameters; crystallization mechanism.

Аннотация. Бинарная композиция полиэтилен/поликарбонат исследована в режиме стандартного дифференциального сканирующего калориметра при постоянной скорости охлаждения из расплава. Анализ параметров нуклеации показал увеличение барьера кристаллообразования ламелярной кристаллизации полиэтилена. Анализ колебания параметра формы показал преобладание в большинстве случаев сферического механизма роста кристаллов. При содержании поликарбоната в композиции 90 % происходит смена сферического механизма роста кристаллов на рост кристаллов в плоскости.

Ключевые слова: полимерный композит; параметры кристаллообразования; механизм кристаллизации.

Анотація. Бінарна композиція поліетилен/полікарбонат досліджена в режимі стандартного диференційного сканувального калориметра при постійній швидкості охолодження з розплаву. Аналіз параметрів нуклеації

показав збільшення бар'єру кристалоутворення ламелярної кристалізації поліетилену. Аналіз коливання параметра форми показав, що в більшості випадків переважає сферичний механізм росту кристалів. При вмісті полікарбонату в композиції 90 % відбувається зміна механізму зростання кристалів зі сферичного на площинний.

Ключові слова: полімерний композит; параметри кристалоутворення; механізм кристалізації.

REFERENCES

- [1] Mikulenok O.I. Polimernye kompozitsionnye materialy. Izuchenie teplofizicheskikh svoystv [Polymer composite materials. The study of their thermal and physical properties]. *Khimicheskaya promyshlennost Ukrainy – Chemical industry of Ukraine*, 2003, no.5, pp. 25–30.
- [2] Privalko V.P. *Spravochnik po fizicheskoy khimii polimerov. Tom 2* [Reference book of the polymers physical chemistry]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1984. 330 p.
- [3] Li Z.M., Yang M.B., Huang R., Feng J.M. Anisotropic microstructure-impact fracture behavior relationship of polycarbonate/polyethylene blends injection-molded at different temperatures. *Polymer*, 2005, Vol. 46, pp. 10466–10477.
- [4] Bartozak Z., Galeski A., Pracella M. Spherulite Nucleation in Blends of Isotactic Polypropylene with Isotactic Poly(butene-1). *J. Appl. Polym. Sci*, 1994, Vol. 54, pp. 1513–1524.
- [5] Favis B.D., Therien D. Factors influencing structure formation and phase size in an immiscible polymer blend of polycarbonate and polypropylene prepared by twin-screw extrusion. *Polymer*, 1991, Vol. 32, no. 8, pp. 1474–1481.
- [6] Li Z.M., Ming Bo Yang, Jan Min Feng, Rui Huang Fibre formation based toughening in polycarbonate/polyethylene alloy compatibilized with diallyl bisphenol a ether grafted polyethylene. *Journal Of Materials Science*, 2001, Vol. 36, pp. 2013–2018.
- [7] Wunderlich B., Boller A., Okazaki I., Ishikiriyama K. Heat capacity determination by temperature-modulated DSC and its separation from transition effects. *Thermochim. Acta*, 1997, Vol. 304, pp. 125–136.
- [8] Iguchi M., Watanabe Y. Kinetics of the epitaxy and the over-growth of polyoxymethylene from molten state on needle-like single-crystals. *Br. Polymer J*, 1977, Vol.9, pp. 251–257.
- [9] Jin J., Song M., Pan F. A DSC study of effect of carbon nanotubes on crystallization behaviour of poly(ethylene oxide). *Termochimica acta*, 2007, Vol. 456, pp. 25–31.
- [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] Mekhilef N., Ait-Kadi A., Ajji A. Blends of Modified Polycarbonate and High Density Polyethylene. *Polymer engineering and science*, 1992, Vol. 32, pp. 894–902.
- [12] Li Z.M., Xie B.H., Yang S., Yang M.B., Huang R. Morphology and Rheological Behaviors of Polycarbonate/High Density Polyethylene in situ Microfibrillar Blends. *Macromol. Mater. Eng*, 2004, Vol. 289, pp. 1087–1095.
- [13] Privalko V.P., Kawai T., Lipatov Yu.S. Crystallization of filled nylon 6. III. Non-isothermal crystallization. *Colloid & Polymer Sci*, 1979, Vol. 257, pp. 1042–1048.
- [14] Roichman Y., Silverstein M.S., Siegmann A., Narkis M. Percolation of electrical conductivity in solution-cast blends containing polyaniline. *J. Macromol. Sci. Phys*, 1999, Vol. 38, pp. 145–161.
- [15] Ajayan P.M., Schadler L.S., Giannaris C., Rubio A. Single-walled carbon nanotube-polymer composites: Strength and weakness. *Adv.Mater*, 2000, Vol.12, pp. 750–761.
- [16] Xia H.S., Song M. Preparation and characterization of polyurethane-carbon nanotube composites. *Soft Matter*, 2005, Vol.1, pp. 386–394.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В самых разнообразных сферах производства и в быту полимерные материалы вытесняются их композициями, которые расширяют спектр использования чистых полимеров. Это предопределено уникальными эксплуатационными характеристиками смесей полимеров – механическими, теплофизическими, электрическими, магнитными, эстетичными и т. д.

Разработка новых композиций полимеров, а также создание и модернизация технологического оборудования для их получения и переработки в изделия предусматривают наличие данных о свойствах этих материалов. Особенное значение эти свойства приобретают во время проектирования оборудования для получения и переработки композиций, а также для определения условий, в которых эти материалы можно применять.

Свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) зависят от структуры, природы, параметров компонентов и даже предыстории получения как самих ПКМ, так и их компонентов, которые очень трудно или даже невозможно учесть во время аналитического определения этих свойств [1].

В связи с этим исследования полимер-полимерных систем продолжают до сих пор. Обоснованием для определения их как нового класса композиционных полимерных материалов являются присущие им в структурно-морфологическом и термодинамическом аспектах некоторые закономерности, которые отсутствуют в смесях полимеров с низкомолекулярными соединениями. В настоящее время ни одна из существующих теорий не может предусмотреть и количественно описать свойства полимер-полимерных смесей. Поэтому экспериментальное исследование

этих смесей дает возможность изучать их свойства, а также использовать в качестве базы для разработки теорий.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Бинарная композиция полиэтилен/поликарбонат (ПЭ/ПК) имеет широкое применение и вызывает интерес к ее исследованию. Так, в работах [5, 11] показано, что, варьируя концентрации исходных полимеров, можно получать композиции с разнообразными свойствами, такими, как повышенная теплостойкость, пониженная влагопроницаемость, высокая механическая прочность. Бинарная композиция ПЭ/ПК является гетерогенной системой [6, 12, 14]. На рис. 1 показано изменение структуры композиции в зависимости от процентного соотношения исходных полимеров [3].

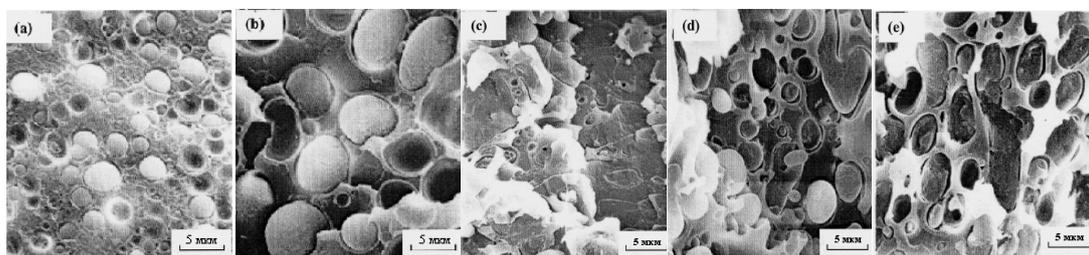


Рис. 1. Микрофотографии СЭМ композиции ПЭ/ПК в разных процентных соотношениях [3]

В матрице ПЭ частички ПК имеют вид капель, а когда ПК является матрицей, то появляются вакантные места между самой матрицей и частичками ПЭ, что напоминает пенную структуру. Эти эффекты зависят от термической предыстории образцов [3, 12].

Исследование сферолитной структуры показало, что с увеличением содержания аморфного полимера формируется менее четкая сферолитная структура; границы между сферолитами размыты, между ними возрастает связанность [6]. Уменьшение среднего размера сферолитов отмечено также в работе [12].

Однако кинетика неизотермической кристаллизации данной композиции, которая дает важную информацию о процессах структурообразования, не была исследована.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – изучение особенностей влияния концентрации исходных полимеров на кинетику кристаллизации полимерной композиции.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Эксперимент

В качестве модельных образцов для исследования были выбраны образцы бинарной композиции ПЭ/ПК в разных процентных соотношениях.

Порошки исходных материалов подвергались сушке при $T = 313$ К с последующим механическим смешиванием. Переработка исследуемых полимеров проводилась методом горячего прессования при

атмосферном давлении. Образцы нагревались до $T = 453$ К, выдерживались 10 мин при постоянной температуре с последующим достаточно медленным (2 К/мин) охлаждением расплава до комнатной температуры. Таким образом, для исследования были выбраны композиции с разной концентрацией исходных полимеров:

Композиция	Содержание ПК, % масс.
ПЭ-0	100
ПЭ-10	90
ПЭ-20	80
ПЭ-50	50
ПЭ-80	20
ПЭ-90	10
ПЭ-100	0

Релаксация энтальпии в процессе охлаждения для получения экзотерм кристаллизации была исследована в сухой азотной атмосфере методом дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) (установка Перкина–Эльмера DSC-2, модернизированная, оборудованная программным обеспечением IFA GmbH, Ulm). Каждый образец сначала выдерживался в расплаве в течение 3 мин при температуре на 50 К выше температуры плавления ПК ($T_m \approx 410$ К) и был охлажден по стандартному ДСК методу до ~ 360 К в одном из четырех доступных режимов постоянных скоростей охлаждения q (20, 10, 5 и 2 К/мин). Калориметр был откалиброван в соответствии с рекомендованной

методикой [7, 14] с использованием бензойной кислоты и индия в качестве эталонов.

Результаты и их обсуждение

Экзотермы кристаллизации и для чистого ПЭ, и для композиции ПЭ/ПК (рис. 2) отсчитывались от

температуры начала кристаллизации T_N и проходили через температуру максимальной скорости кристаллизации T_{max} (табл. 1). Как ожидалось, T_N и T_{max} с увеличением скорости охлаждения q^- уменьшились.

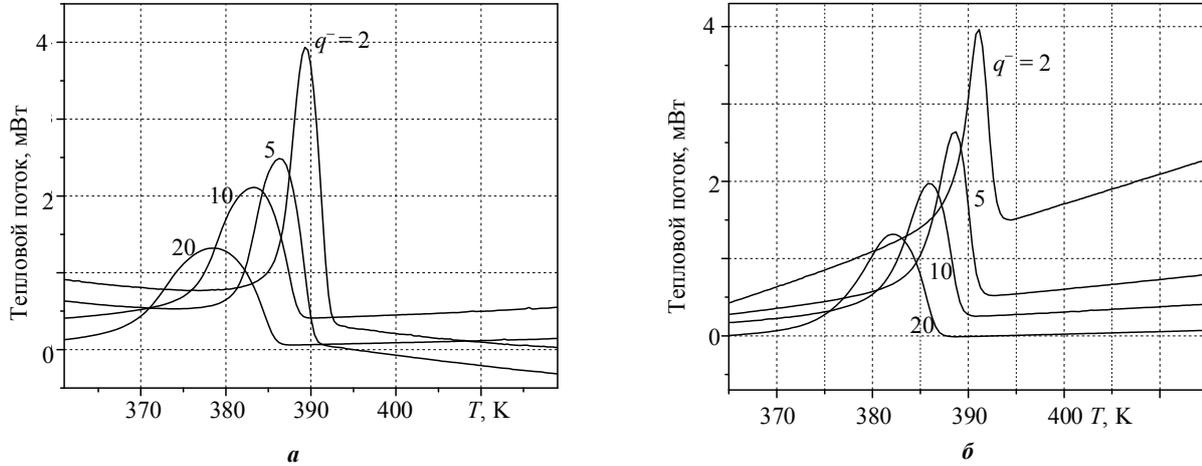


Рис. 2. Экзотермы кристаллизации для ПЭ (а) и ПЭ-90 (б); числа возле кривых указывают на соответствующие скорости охлаждения (в К/мин)

Таблица 1. Температуры начала и максимума кристаллизации, К

Образец	T_N	T_{max}
$q^- = 2$ К/мин		
ПЭ-100	393,1	391,1
ПЭ-90	392,2	389,5
ПЭ-80	390,7	385,9
ПЭ-50	391,3	388,4
ПЭ-20	394	391,9
ПЭ-10	394,7	393,3
$q^- = 5$ К/мин		
ПЭ-100	391	388,6
ПЭ-90	390,3	386,4
ПЭ-80	393,5	389,7
ПЭ-50	389,5	385
ПЭ-20	392,3	390,2
ПЭ-10	391,8	389,8
$q^- = 10$ К/мин		
ПЭ-100	389	385,9
ПЭ-90	388,4	383,3
ПЭ-80	388,2	382,9
ПЭ-50	387,8	380,9
ПЭ-20	390,3	388,3
ПЭ-10	390,2	387,8
$q^- = 20$ К/мин		
ПЭ-100	386,7	381,9
ПЭ-90	385,7	378,4
ПЭ-80	385,4	376,8
ПЭ-50	384,8	377,0
ПЭ-20	389	385,2
ПЭ-10	387,8	384,7

Для нахождения параметров нуклеации и молекулярного транспорта было использовано уравнение [13]

$$\ln \left\{ q^- [(m+1)T_N - T_m^0] (T_m^0)^m / T_N^2 (\Delta T)^{m+1} \right\} = \ln(K_m/a_m) - a_m (T_m^0)^m / T_N (\Delta T)^m, \quad (1)$$

где T_m^0 – равновесная температура плавления; ΔH_m^0 – соответствующая энтальпия плавления «бесконечно больших» кристаллов полимера; $\Delta T = T_m^0 - T_N$ – степень переохлаждения; $a_m = Z/k(\Delta H_m^0)^m$ – приведенный параметр нуклеации; m – безразмерное целое, которое зависит от размерности кристаллообразования, т. е. $m = 1$ – для поверхностной, двухмерной, нуклеации или $m = 2$ – для блоковой (кристаллообразование в напряженной матрице); Z_m – барьер кристаллообразования; $K_m \sim \exp(-\Delta E/kT_N)$ – приведенный транспортный барьер (обычно принимаемый температурно-независимым в области T_m^0); ΔE – соответствующая энтальпия активации; k – постоянная Больцмана.

С использованием метода наименьших квадратов (МНК) из этого уравнения были найдены параметры a_m и K_m (табл. 2, рис. 3). Для двух значений m параметр a_m был большим для бинарной смеси, а параметр K_m – для чистого ПЭ.

Как видно из рис. 3, для каждого образца корреляция данных для первой системы ($m = 1$) при разных режимах кристаллизации была достаточно хорошей (коэффициенты корреляции $R \sim 0.99$); для второго случая ($m = 2$) коэффициент корреляции $R \sim 0.978$,

поэтому можно сделать вывод, что преобладает плоскостной механизм нуклеации. Значения a_m и K_m , полученные МНК, приведены в табл. 2 (в расчетах принята $T_m^0 = 415$ К [2]).

Таблица 2. Параметры кристаллообразования для кристаллизации ПЭ/ПК

Параметр	ПЭ-100	ПЭ-90	ПЭ-80	ПЭ-50	ПЭ-20	ПЭ-10
a_1, K	0,385	0,374	0,368	0,433	0,471	0,468
K_1, K	0,164	0,161	0,150	0,148	0,099	0,098
R_1	0,996	0,991	0,996	0,985	0,997	0,998
$a_2 \cdot 10^6, K$	2,078	1,939	2,300	2,525	2,643	2,737
$K_2 \cdot 10^2, K$	0,451	0,444	0,531	0,587	0,622	0,641
R_2	0,993	0,986	0,913	0,980	0,986	0,996

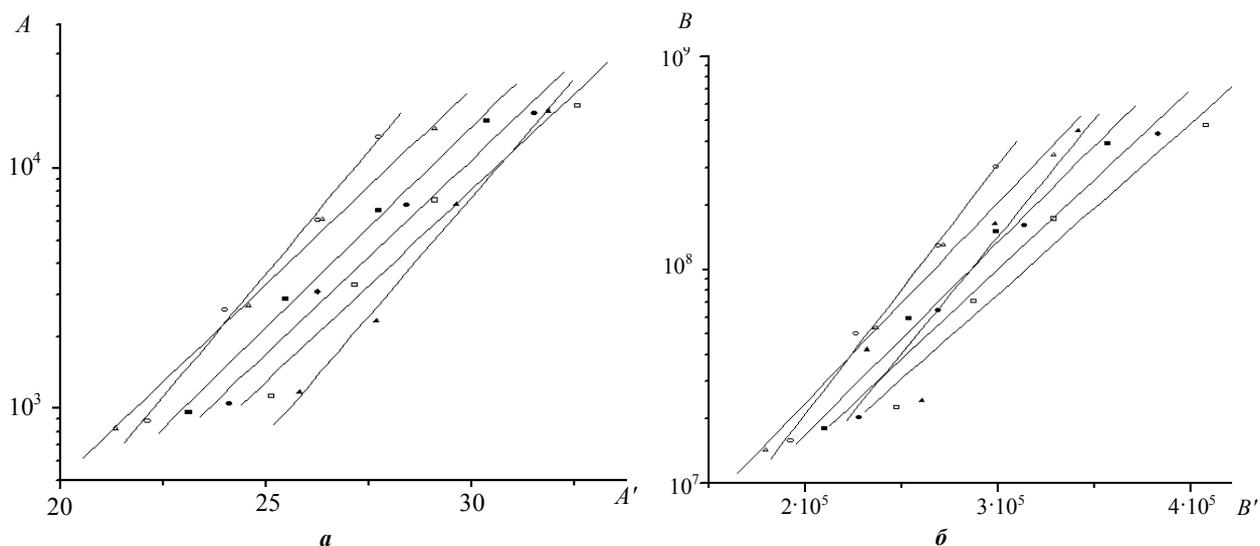


Рис. 3. Совпадение экспериментальных значений T_N при разных скоростях охлаждения с уравнением (1) для ПЭ-100 (закрашенные квадраты), ПЭ-90 (закрашенные круги), ПЭ-80 (закрашенные треугольники), ПЭ-50 (пустые квадраты), ПЭ-20 (пустые круги), ПЭ-10 (пустые треугольники), где $m = 1$ (а), $m = 2$ (б). $A = q^{-1} [2T_N - T_m^0] T_m^0 / T_N^2 (\Delta T)^{-1}$, $A' = T_m^0 / T_N (\Delta T)^{-1} K^{-1}$, $B = q^{-1} [3T_N - T_m^0] (T_m^0)^2 / (T_N^2 \Delta T^3)^{-1}$, $B' = (T_m^0)^2 / (T_N \Delta T^2)^{-1} K^{-1}$

Значение a_m для бинарной композиции изменяется скачкообразно в области перехода от ПЭ-80 до ПЭ-50, т. е. наблюдается увеличение барьера кристаллообразования для кристаллизации ПЭ, в то время как более низкие значения K_m (а следовательно, большие значения ΔE), вероятно, связаны с ограничением транспорта сегментов ПЭ через поверхность раздела ламель-кристалл.

Для смесей ПЭ/ПК при кристаллизации при небольших переохлаждениях гетерогенная нуклеация затруднена по сравнению с чистым ПЭ. В смесях менее активные участки гетерогенности теряют свою активность из-за увеличения энергетического барьера образования ядер критического размера вследствие фазового разделения смеси при кристаллизации [4].

Гладкие унимодальные экзотермы кристаллизации для ПЭ и ПЭ/ПК (см. рис. 2) были проанализированы в рамках стандартного уравнения Колмогорова-Аврами [8]

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

где $\alpha(\tau)$ – объемная часть расплава, которая перешла в кристалл за приведенное время τ (в К); K_n – эффективная константа скорости (в K^{-n}); n – безразмерный параметр формы.

Как видно из рис. 4, экспериментальные данные на всех скоростях охлаждения \bar{q} соответствуют уравнению (2). Это подтверждают чрезвычайно низкие значения статистического параметра χ^2 (табл. 3). Большинство расчетных значений нецелочисленного параметра формы n колебались в относительно узком интервале между 2 и 3, что соответствует предположению об идентичности механизмов кристаллообразования и роста кристаллов во всем диапазоне значений \bar{q} .

Для наполненной системы статистический параметр в несколько раз больше, чем в чистом ПЭ. Это говорит о том, что, возможно, существует другой, отличный от первичного, механизм кристаллообразования, который, вероятней всего, связан с образованием надмолекулярных структур.

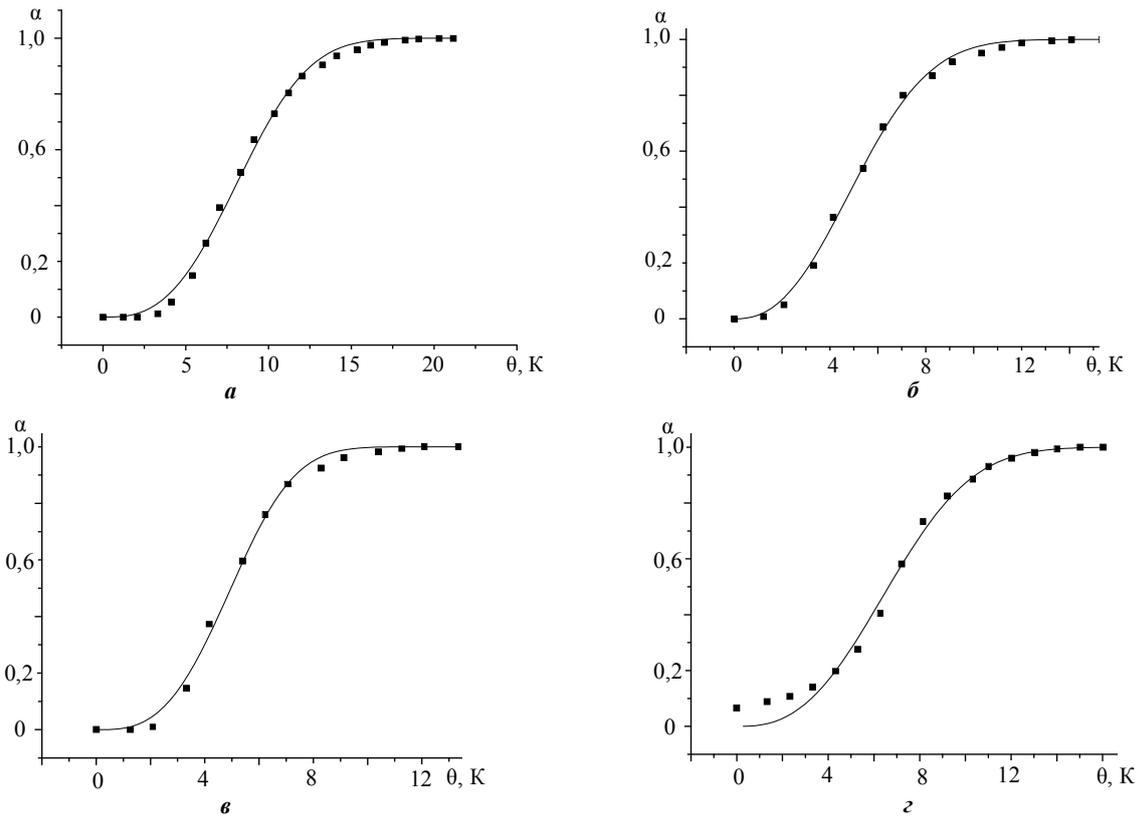


Рис. 4. Соответствие экспериментальных экзотерм для $\bar{q} = 20$ К/мин (а), $\bar{q} = 10$ К/мин (б); $\bar{q} = 5$ К/мин (в); $\bar{q} = 2$ К/мин (г) с уравнением (2) для ПЭ-100

Таблица 3. Параметры уравнения (2)

\bar{q} , К/мин ⁻¹	n	$K_n \cdot 10^5$, К ⁻ⁿ	$\chi^2 \cdot 10^5$
ПЭ-100			
2	2,34	2244	145
5	3,06	511	61
10	2,42	1323	34
20	2,86	164	47
ПЭ-90			
2	3,52	100	116
5	2,77	427	31
10	3,96	60	46
20	2,76	92	14
ПЭ-80			
2	2,24	770	49
5	2,2	89	43
10	2,23	990	21
20	2,34	420	15
ПЭ-50			
2	1,6	242	74
5	2,7	208	22
10	2,74	132	18
20	2,47	20	8
ПЭ-20			
2	1,95	1153	38
5	2,06	468	38
10	3,53	257	16,1
20	2,37	18	12

Продолж. табл. 3

q , К/мин ⁻¹	n	$K_n \cdot 10^5$, К ⁻ⁿ	$\chi^2 \cdot 10^5$
ПЭ-10			
2	1,3	5354	182
5	1,37	1971	40,1
10	1,66	1125	27,5
20	2,13	128	11

Из табл. 3 видно, что для чистого ПЭ показатель Аврами n колебался в интервале между 2 и 3 при различных скоростях охлаждения, что соответствует сферическому росту кристаллов [16]. При добавлении ПК показатель формы показал тенденцию к уменьшению, но оставался больше 2 для образцов ПЭ-90–ПЭ-20. Это свидетельствует о том, что морфология роста кристаллов не изменилась. Однако n для ПЭ-10 был меньше чем 2. Колебание показателя Аврами между 1 и 2 соответствует дискообразному (или плоскостному) росту кристаллов [10, 15].

Изменение морфологии роста в бинарной композиции, другой исходный полимер которой является аморфным, – это результат двух эффектов: растворения и межмолекулярного взаимодействия между двумя полимерами [16]. Эффект растворения подтверждается понижением температуры кристаллизации T_N (табл. 1), но его вклад в этот процесс незначителен. В данном случае изменение морфологии кристаллообразования при высокой концентрации аморфного ПК в матрице ПЭ объясняется существованием

межмолекулярных взаимодействий между ПЭ и ПК. А это означает, что две полимерные матрицы, хотя и не являются совместимыми, даже на простом уровне вандер-ваальсовых взаимодействий влияют друг на друга [9].

ВЫВОДЫ

1. Анализ параметров кристаллообразования, полученных из экзотерм кристаллизации, показал увеличение барьера кристаллообразования ламелярной кристаллизации ПЭ, в то время как более низкие значения K_m (а следовательно, большие значения ΔE), вероятно, связаны с ограничениями транспорта сегментов ПЭ через поверхность раздела «расплав–кристалл».

2. Из результата анализа колебания параметра формы n следует, что в большинстве случаев преобладает сферический механизм роста кристаллов. Но при содержании ПК в композиции 90 % (ПЭ-10) происходит смена сферического механизма роста кристаллов на дискообразный, что свидетельствует о взаимодействии двух полимерных матриц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Микуленок, О. І.** Полимерные композиционные материалы. Изучение теплофизических свойств [Текст] / О. І. Микуленок // Химическая промышленность Украины. – 2003. – № 5. – С. 25–30.
- [2] **Привалко, В. П.** Справочник по физической химии полимеров [Текст] / В. П. Привалко. – К. : Наукова думка, 1984. – Т. 2. – 330 с.
- [3] Anisotropic microstructure-impact fracture behavior relationship of polycarbonate/polyethylene blends injection-molded at different temperatures [Text] / Z. M. Li, M. B. Yang, R. Huang and J. M. Feng // Polymer. – 2005. – Vol. 46. – P. 10466–10477.
- [4] **Bartozak, Z.** Spherulite Nucleation in Blends of Isotactic Polypropylene with Isotactic Poly(butene-1) [Text] / Z. Bartozak, A. Galeski, M. Pracella // J. Appl. Polym. Sci. – 1994. – Vol. 54. – P. 1513–1524.
- [5] **Favis, B. D.** Factors influencing structure formation and phase size in an immiscible polymer blend of polycarbonate and polypropylene prepared by twin-screw extrusion [Text] / B. D. Favis and D. Therien // Polymer. – 1991. – Vol. 32, nr 8. – P. 1474–1481.
- [6] Fibre formation based toughening in polycarbonate/polyethylene alloy compatibilized with diallyl bisphenol a ether grafted polyethylene [Text] / Z. Ming Li, Ming Bo Yang, Jan Min Feng, Rui Huang // Journal Of Materials Science. – 2001. – Vol. 36. – P. 2013–2018.
- [7] Heat capacity determination by temperature-modulated DSC and its separation from transition effects [Text] / B. Wunderlich, A. Boller, I. Okazaki, K. Ishikiriyama // Thermochim. Acta. – 1997. – Vol. 304. – P. 125–136.
- [8] **Iguchi, M.** Kinetics of the epitaxy and the over-growth of polyoxymethylene from molten state on needle-like single-crystals [Text] / M. Iguchi, Y. Watanabe // Br. Polymer J. – 1977. – Vol. 9. – P. 251–257.
- [9] **Jin, J.** A DSC study of effect of carbon nanotubes on crystallization behaviour of poly(ethylene oxide) [Text] / J. Jin, M. Song, F. Pan // Thermochimica acta. – 2007. – Vol. 456. – P. 25–31.

- [10] 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] **Mekhilef, N.** Blends of Modified Polycarbonate and High Density Polyethylene [Text] / N. Mekhilef, A. Ait-Kadi and A. Ajji // *Polymer engineering and science.* – 1992. – Vol. 32. – P. 894–902.
- [12] Morphology and Rheological Behaviors of Polycarbonate/High Density Polyethylene in situ Microfibrillar Blends [Text] / Z. M. Li, B. H. Xie, S. Yang, M. B. Yang, R. Huang // *Macromol. Mater. Eng.* – 2004. – Vol. 289. – P. 1087–1095.
- [13] **Privalko, V. P.** Crystallization of filled nylon 6. III. Non-isothermal crystallization [Text] / V. P. Privalko, T. Kawai, Yu. S. Lipatov // *Colloid & Polymer Sci.* – 1979. – Vol. 257. – P. 1042–1048.
- [14] **Roichman, Y.** Percolation of electrical conductivity in solution-cast blends containing polyaniline [Text] / Y. Roichman, M. S. Silverstein, A. Siegmann, M. Narkis // *J. Macromol. Sci. Phys.* – 1999. – Vol. 38. – P. 145–161.
- [15] Single-walled carbon nanotube-polymer composites: Strength and weakness [Text] / P. M. Ajayan, L. S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio // *Adv. Mater.* – 2000. – Vol. 12. – P. 750–761.
- [16] **Xia, H. S.** Preparation and characterization of polyurethane-carbon nanotube composites [Text] / H. S. Xia, M. Song // *Soft Matter.* – 2005. – Vol. 1. – P. 386–394.

© Р. В. Дінжос, Н. М. Фіалко, Е. А. Лисенков, М. А. Рехтета

Надійшла до редколегії 13.12.13

Статтю рекомендує до друку

д-р техн. наук, проф. *О. О. Мочалов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2014