

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 620.22:678.742.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

Поступило в редакцию 14.02.2018

Received 14.02.2018

Член-корреспондент С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Республика Беларусь***СМЕСИ АЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ
С ФУНКЦИОналиЗОВАННЫМИ ПОЛИОЛЕФИНАМИ:
МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО
ПОВЕДЕНИЯ РАСПЛАВОВ, СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Аннотация. Исследовано влияние добавки 28 мас. % функционализированных полиолефинов (фПО) – смесей полиэтилена и сополимера этилена с высшим олефином, содержащих 0,43 и 0,77 мас. % привитого мономера, имеющего в своем составе две карбоксильные группы, к алифатическим полиамамдам ПА6 и ПА66 на особенности структуры, реологическое поведение расплавов и механические свойства смесевых материалов. Исследуемые материалы получали методом реакционного смешения компонентов в расплаве в экструзионном реакторе-смесителе. Показано, что для смесей ПА66/фПО характерны более существенные изменения анализируемых характеристик по сравнению с таковыми на основе ПА6 при варьировании концентрации привитого мономера. Установлено аномально резкое повышение (более чем на два десятичных порядка) вязкости расплава смеси ПА66 с фПО, содержащем 0,77 мас. % привитого мономера, по сравнению с вязкостью исходного ПА66, что обусловлено спецификой межфазных взаимодействий в смесях.

Ключевые слова: алифатический полиамид, полиолефин, смеси полиамидов с полиолефинами, функционализация полиолефинов, межфазные взаимодействия

Для цитирования: Песецкий, С. С. Смесии алифатических полиамидов с функционализированными полиолефинами: межфазные взаимодействия, особенности реологического поведения расплавов, структуры и механических свойств / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 480–487. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

Corresponding Member Stepan S. Pesetskii, Yuri M. Krivoguz*V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***BLENDS OF ALIPHATIC POLYAMIDES WITH FUNCTIONALIZED POLYOLEFINS: INTERPHASE
INTERACTIONS, FEATURES OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF MELTS, STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES**

Abstract. The effect of addition of functionalized polyolefins (fPO) in an amount of 28 wt. % – mixtures of polyethylene and copolymer of ethylene with higher olefin containing 0.43 and 0.77 wt. % grafted monomer having two carboxyl groups in its composition – to aliphatic polyamides PA6 and PA66 on the structural features, the rheological behavior of melts and the mechanical properties of mixed materials was investigated. The materials studied were prepared by reactive mixing of the components in a melt in an extrusion reactor. It is shown that mixtures of PA66/fPO are characterized by more significant changes in the characteristics under analysis compared with those based on PA6 when the concentration of a grafted monomer is varied. An abnormally sharp increase (by more than two decimal orders) of the melt viscosity of a mixture of PA66 with fPO containing 0.77 wt. % of the grafted monomer, compared with the viscosity of initial PA66, is due to the specificity of the interphase interactions in the mixtures.

Keywords: aliphatic polyamides, polyolefins, mixtures of polyamides with polyolefins, functionalization of polyolefins, interphase interactions

For citation: Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M. Blends of aliphatic polyamides with functionalized polyolefins: interphase interactions, features of the rheological behavior of melts, structure and mechanical properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 480–487 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

Введение. Смеси термопластичных полимеров привлекают к себе неослабевающее внимание вследствие возможностей сочетания лучших характеристик в одном материале, устранения недостатков отдельных компонентов при смешении, реализации комплекса показателей недостижимых для гомополимеров при быстром и экономически выгодном расширении марочного ассортимента [1]. Среди полимерных смесей инженерно-технического назначения особое место вследствие комплекса уникальных потребительских свойств принадлежит смесям алифатических полиамидов (ПА) с полиолефинами (ПО) [2]. Главными их преимуществами перед гомополиамидами являются повышенная ударная вязкость, пониженное водопоглощение, улучшенные технологичность при переработке и стабильность размеров при переменной влажности, более низкая стоимость. Учитывая, что среди алифатических ПА наиболее распространены ПА6 и ПА66 (в странах Западной Европы на их долю приходится ~92 % всех производимых ПА), роль которых как инженерных пластиков примерно одинакова [1], то и смесевые системы создаются, главным образом, на базе этих полиамидов.

Из-за высокой плотности энергии когезии (соответственно 23,2 и 23,3 (Дж · см⁻³)^{0,5} – для ПА6 и ПА66) алифатические ПА не совместимы с ПО, для которых данный показатель существенно ниже (16,1 (Дж · см⁻³)^{0,5} – для полиэтилена и 16,3 (Дж · см⁻³)^{0,5} – для полипропилена) [2]. Поэтому смеси ПА/ПО характеризуются высоким поверхностным натяжением (14–18 Н/м), низкой межфазной адгезией и выраженным фазовым разделением [2].

Экономически выгодным путем получения технологически совместимых смесей, которым присущи необходимые и полезные с коммерческой точки зрения свойства, является реакционное совмещение компонентов. Технология подобных материалов базируется, главным образом, на смешении в расплаве ПА с ПО, предварительно функционализированными прививкой мономеров, содержащих в своем составе полярные функциональные группы (чаще всего ангидридные или карбоксильные) [3]. Функциональные группы привитых мономеров при смешении в расплаве могут вступать в обычные химические реакции, наблюдаемые в низкомолекулярных органических веществах [3; 4]. Потенциально возможны взаимодействия функционализированных полиолефинов в смесях с полярными полимерами от сильного ковалентного или ионного (кислотно-основного) связывания до относительно слабых взаимодействий, приводящих к образованию водородных, ион-дипольных, диполь-дипольных и донорно-акцепторных связей [2; 4].

Несмотря на то что смеси ПА/фПО выпускаются в промышленном масштабе [1] механизм взаимодействия фПО с макромолекулами ПА, содержащими, как правило, концевые аминные и карбоксильные группы, а также внутрицепные амидные группы, полностью не выяснен. Следует учитывать, что амидные группы значительно менее реакционноспособны, чем концевые первичные аминокруппы [4; 5]. Однако поскольку концентрация внутрицепных амидных групп существенно более высокая, чем аминокрупп, то вклад взаимодействий с участием первых из них может быть весьма весомым.

Цель работы – анализ специфики взаимодействий макромолекул ПА6 и ПА66 в смесях с фПО, содержащих в своем составе привитый мономер с функциональными карбоксильными группами, а также обусловленных этими взаимодействиями особенностей структуры и свойств смесевых материалов.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования служили ПА6 производства ОАО «Гродно Азот» (марка для контакта с пищевыми продуктами); ПА66 (марка 27EN, производство фирмы Pingdingshan Senma Engineering Plastics Co. LTD, Henan, КНР). В качестве фПО использовали смесь полиэтилена с сополимером этилена и высшего олефина, функционализированную прививкой мономера – ненасыщенной дикарбоновой кислоты (производство ИММС НАН Беларуси, ТУ ВУ 400084698.170–2008); фПО получали путем свободнорадикальной прививки мономера в расплаве при использовании в качестве реактора двухшнекового экструдера

TSSK-35/40 (производство КНР, диаметр шнеков 35 мм, отношение $L / D = 40$, число независимых секций обогрева материального цилиндра 10). Содержание привитого мономера (степень прививки в фПО), определенное по методике [6], составляло 0,43 и 0,77 % (здесь и далее концентрацию выражали в мас. %). Функционализированные таким образом смеси обозначены соответственно как фПО-I и фПО-II. Показатели свойств исходных полимерных компонентов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Показатели свойств исходных полимерных компонентов

T a b l e 1. Properties of the initial polymer components

Компонент Component	Содержание привитого мономера, мас. % The content of the grafted monomer, wt. %	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	$\eta \cdot 10^{-3}$, Па · с $\eta \cdot 10^{-3}$, Pa · s	γ , с ⁻¹ γ , s ⁻¹	$T_{пл}$, °С T_m , °С	$T_{кр}$, °С T_{cr} , °С
ПА6	–	8,4	1,135	17,32	223,0	192,5
ПА66	–	41,0 (141,2*)	0,233 (0,159*)	84,26	265,0	235,0
ПО	–	2,2	11,203	4,06	109,3; 117,7	101,3
фПО-I	0,43	0,5	50,975	0,89	110,0; 116,2	100,5
фПО-II	0,77	0,4	63,024	0,79	112,0; 117,4	98,0

П р и м е ч а н и е: * – значения показателей определены при нагрузке $P = 50$ Н; γ – скорость сдвига при течении расплава через капилляр.

N o t e: * – The values of the indicators are determined at a load $P = 50$ N; γ – shear rate at melt flow through the capillary.

Для получения смесевых композитов гранулированные компоненты (ПА6, ПА66 и исходные ПО или фПО) смешивали между собой и с порошкообразной стабилизирующей добавкой (антиоксидант «Irganox 1010» производства BASF, ФРГ) в двухлопастном смесителе. Грануляты ПА6 и ПА66 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Далее полученную механическую смесь, включающую 28 % ПО или фПО и 0,3 % стабилизатора, подвергали соэкструзии в расплаве. Температура в основных зонах смешения материального цилиндра экструдера TSSK-35/40 составляла 250 °С для смесей на основе ПА6 и 275 °С – для ПА66.

Полученные таким образом грануляты смесевых материалов высушивали до остаточной влажности $\leq 0,1$ % и использовали для анализа реологических свойств расплавов. Анализ осуществляли с помощью прибора RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd, Великобритания, позволяющего фиксировать значения показателя текучести (ПТР) и вязкости (η) расплава. Значения ПТР определяли согласно ГОСТу 11262–76 при диаметре капилляра 2,095 мм, нагрузке $P = 21,6$ Н (кроме отдельных экспериментов) и температуре $T = 250$ и 275 °С для композитов на базе ПА6 и ПА66 соответственно.

Изготовление экспериментальных образцов осуществляли литьем под давлением на термопластавтомате EN-30 (Тайвань) с объемом впрыска 30 см³.

Образцы для испытаний методом растяжения представляли собой лопатки типа 5 по ГОСТу 11262–80 с размером рабочей части 45 × 5 × 2 мм. Испытания проводили на универсальной машине Instron 5567 (Великобритания) при скорости нагружения 50 мм/мин.

Анализ кристаллической структуры материалов осуществляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (микроккалориметр Diamond DSC, фирма Perkin Elmer, США, навеска 7 мг, скорость нагрева-охлаждения 15 °С/мин).

Результаты и их обсуждение. Особый интерес представляет анализ реологических свойств расплавов исследуемых материалов, поскольку вязкость (текучесть) расплава при прочих равных условиях сильно зависит от межфазных превращений [7]. В общем случае вязкость расплава полимерной смеси ($\eta_{см}$) зависит от вязкости расплавов компонентов и состава смеси [1; 7]. Характер взаимовлияния компонентов полимерной смеси на $\eta_{см}$ может быть охарактеризован при использовании логарифмического правила [2; 8]:

$$\log \eta_{\text{см}} = \sum \varphi_i \log \eta_i, \quad (1)$$

где φ_i и η_i – соответственно объемная доля и вязкость расплава i -го компонента смеси.

Известны четыре типа полимерных смесей. Среди них аддитивные смеси, вязкость расплава которых подчиняется уравнению (1). Смеси с положительным и отрицательным отклонением от этого уравнения, для которых характерны соответственно повышенные или пониженные значения $\eta_{\text{см}}$. Последнее характерно для несовместимых компонентов со слабыми межфазными взаимодействиями. И наконец, смеси, обнаруживающие в зависимости от условий течения как положительное, так и отрицательное отклонение $\eta_{\text{см}}$ от аддитивных значений (подобный вид зависимости характерен для материалов, в которых происходят фазово-структурные превращения при течении) [2].

Сопоставление данных по вязкости и текучести расплавов ПА/ПО и ПА/фПО (табл. 2) свидетельствует о сильном влиянии концентрации прививаемого к ПО мономера на реологическое поведение расплавов смесевых материалов.

Т а б л и ц а 2. Показатели реологических свойств смесевых материалов, а также потеря массы (Δm) после их экстракции в муравьиной кислоте

T a b l e 2. Indicators of the rheological properties of the mixture materials, as well as mass loss (Δm) after their extraction in formic acid

Смесевой материал Mixed material	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	$\eta_{\text{см}} \cdot 10^{-3}$, Па · с $\eta_{\text{mix}} \cdot 10^{-3}$, Pa · s	γ , с ⁻¹ $\dot{\gamma}$, s ⁻¹	Δm , % Δm , %
ПА6/ПО	8,7	1,237	15,90	72,4
ПА6/фПО-I	2,7	3,977	4,94	70,3
ПА6/фПО-II	1,0	10,809	1,82	68,0
ПА66/ПО	30,7 (76,2*)	0,351	56,05	72,8
ПА66/фПО-I	10,0 (20,0*)	1,076	18,26	66,0
ПА66/фПО-II	1,3*	18,682	2,44*	63,0

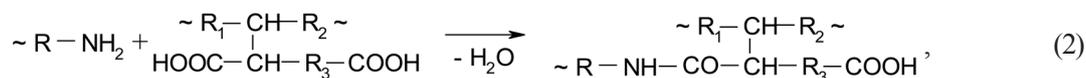
П р и м е ч а н и я: * – значения показателей определены при нагрузке $P = 50$ Н; Δm – количество ПА, вымываемого из смесевых материалов при его экстракции в муравьиной кислоте.

N o t e s: * – The values of the indicators are determined at a load $P = 50$ N; Δm – the amount of PA eluted from the mixture material when it is extracted in formic acid.

При использовании в смесях исходных (не функционализированных) ПО их вязкость близка к таковой для исходных ПА, что свидетельствует о слабом межфазном взаимодействии в них. Поскольку скорость сдвига, как видно из табл. 2, при реологических измерениях имеет относительно низкую величину, то можно полагать, что экспериментально определенная $\eta_{\text{см}}$ примерно соответствует ньютоновской вязкости. Прививка мономера к макромолекулам ПО приводит к росту вязкости их расплавов. Как видно из табл. 1, для фПО-I ПТР снижается по сравнению с исходным ПО в 4,4 раза, а для фПО-II – в 5,5 раз. Для вязкости смесевых материалов характерны более сильные изменения, особенно при использовании в качестве второго компонента фПО-II с повышенной (0,77 %) концентрацией привитого мономера. Так, вязкость смеси ПА6/фПО-II в 8,4 раза превышает таковую для исходного ПА6 и в 8,7 раз – для композита ПА6/ПО. В случае смесей ПА66/фПО-II наблюдается феноменально резкое снижение текучести расплава, который при нагрузке $P = 21,6$ Н вообще не вытекает из капилляра, а при $P = 50$ Н его вязкость более, чем в 117,5 раз превышает таковую для исходного ПА66, т. е. повышение вязкости расплава ПА66 в смесях с фПО многократно более высокое, чем ПА6 при тех же соотношениях компонентов и это несмотря на то что вязкость расплава исходного ПА6 почти в пять раз превышает таковую для ПА66. Эти данные свидетельствуют о сильном отклонении реологического поведения расплавов ПА/фПО от уравнения (1) и чрезвычайно высокой зависимости значений показателей реологических свойств смесей ПА/фПО (особенно смесей на основе ПА66) от концентрации привитого карбоксилсодержащего мономера. Следует отметить, что повышение степени прививки мономера от 0,43 до 0,77 % не приводит к заметному изменению реологических свойств исходных фПО (значения ПТР для фПО-I и фПО-II равны соответственно 0,5 и 0,4 г/10 мин). Это озна-

чает, что решающий вклад в повышение вязкости смесевых ПА композитов при увеличении концентрации привитого мономера в структуре фПО должны вносить специфические межфазные взаимодействия. Потенциально возможные взаимодействия макромолекул ПА с фПО можно представить следующим образом.

Во-первых, возможны реакции концевых аминогрупп полиамидов с привитыми карбоксильными группами в структуре фПО, приводящие к образованию привитых сополимеров [9]:

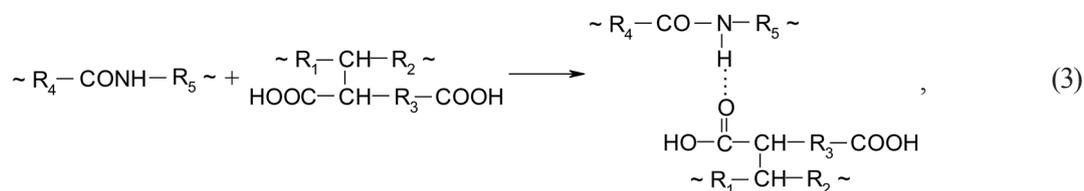


где R – фрагмент цепи ПА, связанный с концевой аминогруппой; R₁, R₂ – фрагменты макромолекул фПО; R₃ – углеводородный радикал в структуре прививаемого мономера.

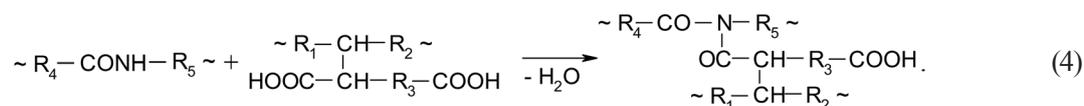
При взаимодействии с фПО концевых аминогрупп разнородных макромолекул ПА наряду с прививкой должно происходить удлинение полиамидных цепей.

Внутрицепные амидные группы –NH–CO– макромолекул ПА могут взаимодействовать с фПО с образованием межцепных водородных и (или) ковалентных связей [9–11]:

образование межцепных водородных связей



где R₄ и R₅ – фрагменты макромолекул ПА, связанные с амидной группой;
ковалентное связывание



Очевидно, что в зависимости от стерических и других факторов возможно протекание одновременно взаимодействий по схемам (2)–(4) или различных их сочетаний. Реализация каждой из них непременно приводит к росту вязкости расплавов смесей вследствие увеличения молекулярной массы, межцепного сшивания или повышения степени разветвленности макромолекул ПА.

Поскольку водородные связи лабильны [12] и могут обратимо диссоциировать при переменной температуре (разрушаться, когда компоненты смеси находятся в расплаве), то очевидно, что основной вклад в изменение реологических свойств расплавов ПА должны вносить реакции по концевым NH₂ группам, приводящие к образованию привитых сополимеров и удлинению цепи (2), а также процессы взаимодействия внутрицепных амидных групп с карбоксильными группами привитого мономера в структуре макромолекул фПО. Так как, в отличие от ПА6, в макромолекулах ПА66 могут присутствовать две концевые первичные аминогруппы, то вклад реакций, протекающих с участием этих групп в композитах ПА66/фПО, может быть более существенным. Кроме того, как следует из сопоставления химической структуры повторяющихся звеньев макромолекул ПА6 ([–NH–(CH₂)₅–CO–]_n) и ПА66 ([–NH–(CH₂)₆–NHCO–(CH₂)₄–CO–]_n) при одинаковом значении гетероцепной характеристики, равной отношению числа амидных групп к числу метиленов в структуре элементарного звена, в полиамиде 6 число метиленовых групп в звене нечетное, в полиамиде 66 – четное. Как показано в [9] данный факт может иметь решающее значение в пространственной ориентации фрагментов макромолекул ПА и реакционной способности их функциональных групп вследствие этого, что, видимо, имеет большое значение в повышении выхода продуктов межцепных взаимодействий, протекающих по схеме (4) и приводящих к более интенсивному росту вязкости расплава смесей ПА66/фПО.

Протекание межцепных реакций должно приводить к образованию как привитых, так и частично пространственно сшитых сополимеров. Данный факт подтверждается экспериментально при анализе экстракции смесей в муравьиной кислоте, являющейся одним из наиболее эффек-

тивных растворителей алифатических ПА [9]. При отсутствии специфических взаимодействий между фПО и ПА последние должны относительно легко экстрагироваться из смеси ПА/фПО. Полного удаления полиамидной фазы при этом может не произойти вследствие ограничения диффузионных процессов из-за пространственных затруднений (механические зацепления макромолекул, блокирование фазы ПА полиолефином и т. п.).

Результаты экспериментов по экстракции приведены в табл. 2. Из нее видно, что доля экстрагируемых ПА6 и ПА66 из смесей с исходным ПО существенно более высокая, чем из смесей на основе фПО. Повышение концентрации привитого мономера в фПО приводит к снижению доли ПА, вымываемого растворителем из смеси ПА/фПО при экстракции. В однотипных смесях количество экстрагируемого ПА6 превосходит таковое для ПА66. Например, из смеси ПА6/фПО-II при экстракции удаляется 68 % ПА6, а из смеси ПА66/фПО-II – 63 % ПА66, что является подтверждением более интенсивного взаимодействия макромолекул ПА66 с фПО, приводящего к образованию ковалентных межцепных связей, не разрушающихся при воздействии сильного растворителя.

Протекание межфазных взаимодействий в смесях сказывается на их физической структуре, что фиксируется методом ДСК, а также механических характеристиках. Как видно из рис. 1, на кривых нагрева смесей ПА/фПО в отличие от таковых с нефункционализированным ПО проявляются дублетные пики в температурной области плавления полиамидов.

Причем оба максимума дублетных пиков сдвинуты в сторону низких температур по сравнению со значением температуры плавления ($T_{пл}$) для полиамидов в смесях с исходным ПО. Дублетные пики плавления характерны и для фазы фПО в смесях (табл. 3).

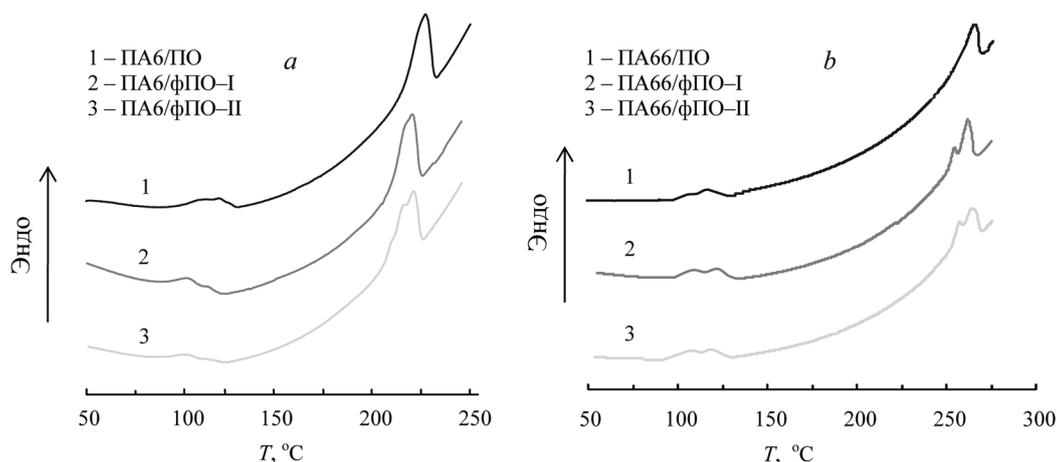


Рис. 1. ДСК кривые при нагреве смесей ПА6 (а), ПА66 (b) с ПО и фПО
 Fig. 1. DSC curves at heating of mixtures of PA6 (a), PA66 (b) with PO and fPO

Т а б л и ц а 3. Параметры, характеризующие плавление и кристаллизацию компонентов ПА смесей

Table 3. Parameters characterizing the melting and crystallization of PA mixture components

Смесь Blends	Полиолефиновая фаза Polyolefin phase		Полиамидная фаза Polyamide phase		
	$T_{пл}^*$, °C T_m^* , °C	$T_{кр}^*$, °C T_{cr}^* , °C	$T_{пл}^*$, °C T_m^* , °C	$T_{кр}^*$, °C T_{cr}^* , °C	$\Delta H_{кр}$, Дж/г ΔH_{cr} , J/g
Смеси на основе ПА 6 Blends based on PA 6					
ПА6/ПО	117,2	102,7	222,9	193,3	49,1
ПА6/фПО-I	106; 117,3	94,8; 103,9	220,7	190,1	48,9
ПА6/фПО-II	105; 118; 0	92,3; 100,8	215,9; 220,9	189,2	43,4
Смеси на основе ПА 66 Blends based on PA 66					
ПА66/ПО	106,2; 118,4	102,3	265,4	235,3	43,4
ПА66/фПО-I	105,8; 118,5	94,4; 102,7	254,4; 262,0	233,9	40,8
ПА66/фПО-II	106,2; 118,6	92,4; 101,9	257,6; 263,8	236,8	40,2

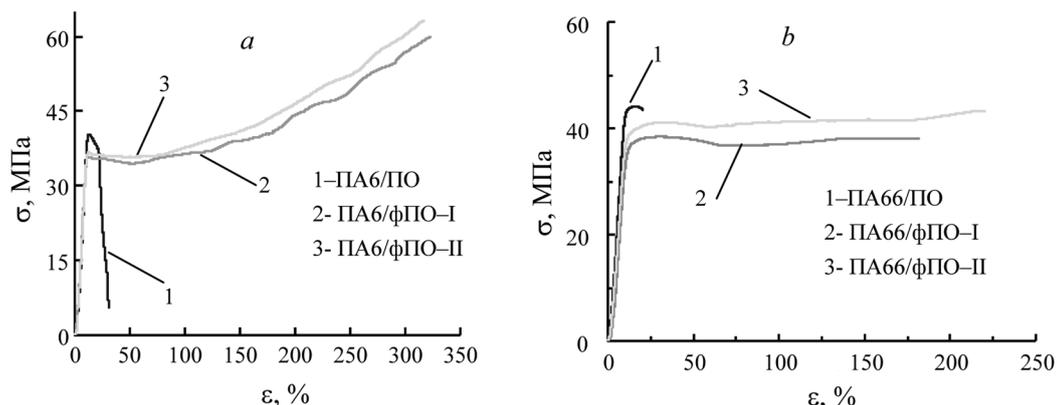


Рис. 2. Деформационные кривые смесевых материалов на основе ПА6 (а) и ПА66 (b)

Fig. 2. Deformation curves of mixed materials based on PA6 (a) and PA66 (b)

Следует полагать, что причиной проявления дублетных пиков плавления является образование привитых сополимеров, наличие которых, несомненно, должно снижать плотность упаковки макромолекул в межфазных слоях и, как следствие, значение $T_{пл}$ компонентов. Интенсивные взаимодействия в межфазных областях ограничивают молекулярную подвижность и затрудняют кристаллизацию ПА в смесях, что фиксируется по снижению значений температуры кристаллизации ($T_{кр}$) и теплоты кристаллизации ($\Delta H_{кр}$), а значит и степени кристалличности фазы ПА (табл. 3).

На рис. 2 представлены деформационные кривые растяжения смесевых материалов, из которых следует, что их характер определяется типом использованного полиолефина. Разрушение образцов смесей ПА/ПО происходит при малых значениях относительного удлинения (ϵ_r) до начала образования шейки. Использование в смесях фПО способствует существенному повышению деформационной способности ПА материалов (для смесей ПА6/фПО ϵ_r возрастает до 11,6 раз, а для ПА66/фПО – до 7,9 раз). Следует отметить, что смеси ПА6/фПО упрочняются на стадии деформирования шейки и их прочность при растяжении (σ_p) примерно в 1,7 раз превышает верхний предел текучести (σ_T). Причиной этого является ориентационное упрочнение микрофибрил, образующихся на стадии рекристаллизации материала в шейке [13]. При растяжении смесей ПА66/фПО упрочнения материала не наблюдается. Разрушающее напряжение при разрыве σ_p для ПА66/фПО близко к величине верхнего предела текучести $\sigma_{ТВ}$. Это происходит, видимо, вследствие различия в структуре кристаллитов ПА6 и ПА66 в смесях. Важно отметить, что с увеличением степени прививки мономера значения показателей механических свойств повышаются (рис. 2, кривые 2, 3). Очевидной причиной этого является интенсификация межфазных взаимодействий в смесях.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о решающей роли межфазных взаимодействий в формировании структуры и достижении значений реологических и механических характеристик смесевых материалов ПА/фПО. Определяющее влияние на уровень упомянутых взаимодействий и показателей свойств оказывает как природа ПА, так и концентрация привитого полярного мономера в структуре фПО, что следует учитывать в технологии коммерческих смесевых материалов. Особое внимание при этом следует обращать на феноменально резкий рост вязкости расплава смесей ПА66/фПО при повышении концентрации привитого мономера в относительно узком диапазоне.

Список использованных источников

1. Полимерные смеси / под ред. Д. Р. Пола, К. Б. Бакнелла. – СПб., 2009. – 606 с.
2. Jurkowski, B. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology and high elastic properties of melts / B. Jurkowski, S. S. Pesetskii // Polyolefin Blends / ed. D.Nwabanma, T. Kyu. – New Jersey, 2008. – Ch. 18. – P. 527–555.
3. Chung, T. C. Functionalization of polyolefins / T. C. Chung. – San Diego, 2002. – 274 p.

4. Moad, G. The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion / G. Moad // *Progress in Polymer Science*. – 1999. – Vol. 24, N 1. – P. 81–142. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(98\)00017-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(98)00017-3)
5. Duin, M. V. Blends of polyamides and maleic-anhydride-containing polymers: interfacial chemistry and properties in reactive modifiers for polymers / M. V. Duin, R. D. M. Borggreve // *Reactive Modifiers for Polymers* / ed. S. Al. Malaika. – London, 1997. – P. 133–162.
6. Определение эффективности прививки функциональных групп к макромолекулам полиолефинов методом ИК-спектроскопии / С. С. Песецкий [и др.] // *Весті АН Беларусі. Сер. хім. навук*. – 1997. – № 4. – С. 15–19.
7. White, J. L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts / J. L. White // *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices* / ed. K. Sols. – London, 1980.
8. Strategies for compatibilization of polymer blends / C. Koning [et al.] // *Progress in Polymer Science*. – 1998. – Vol. 23, N 4. – P. 707–757. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(97)00054-3)
9. Коршак, В. В. Гетероцепные полиамиды / В. В. Коршак, Т. М. Фрунзе. – М., 1962. – 523 с.
10. Amine/anhydride reaction versus amide/anhydride reaction in polyamide/anhydride carriers / P. Marechar [et al.] // *J. Polymer Science*. – 1995. – Vol. 33, N 5. – P. 757–766. <https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330501>
11. Oshinski, A. J. The role of matrix molecular weight in rubber thoghened nylon 6 blends. 1. Morphology / A. J. Oshinski, H. Keskkula, D. R. Paul // *Polymer*. – 1996. – Vol. 37, N 22. – P. 4891–4907. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00373-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00373-4)
12. Пиментел, Дж. Водородная связь / Дж. Пиментел, О. Мак-Клеллан. – М., 1964. – 462 с.
13. Бартнев, Т. М. Физика и механика полимеров / Т. М. Бартнев, Ю. В. Зелнев. – М., 1983. – 392 с.

References

1. Paul D. R., Bucknell K. B., eds. *Polymeric mixtures*. Saint Petersburg, Scientific foundations of technology, 2009. 606 p. (in Russian).
2. Jurkowski B., Pesetskii S. S. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology and high elastic properties of melts. Nwabunma D., Kyu T., eds. *Polyolefin Blends*. New Jersey, 2008, ch. 18, pp. 527–555.
3. Chung T. C. *Functionalization of polyolefins*. San Diego, 2002. 274 p.
4. Moad G. The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion. *Progress in Polymer Science*, 1999, vol. 24, no. 1, pp. 81–142. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(98\)00017-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(98)00017-3)
5. Duin M. V., Borggreve R. D. M. Blends of polyamides and maleic-anhydride-containing polymers: interfacial chemistry and properties in reactive modifiers for polymers. Malaika S. Al., ed. *Reactive Modifiers for Polymers*. London, 1997, pp. 133–162.
6. Pesetskii S. S., Kuzavkov A. I., Kasperovich O. M., Krivoguz Yu. M. Determination of the effectiveness of grafting functional groups to macromolecules of polyolefins by IR spectroscopy. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 1997, no. 4, pp. 15–19 (in Russian).
7. White J. L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts. Sols K., ed. *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices*. London, 1980.
8. Koning C., Duin M. V., Pagnou-lee C., Jerome R. Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in Polymer Science*, 1998, vol. 23, no. 4, pp. 707–757. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(97)00054-3)
9. Korshak V. V., Frunze T. M. *Heterochain polyamides*. Moscow, 1962. 523 p. (in Russian).
10. Marechar P., Coppens G., Legras R., Deconinck J. M. Amine/anhydride reaction versus amide/anhydride reaction in polyamide/anhydride carriers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1995, vol. 33, no. 5, pp. 757–766. <https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330501>
11. Oshinski A. J., Keskkula H., Paul D. R. The role of matrix molecular weight in rubber thoghened nylon 6 blends. 1. Morphology. *Polymer*, 1996, vol. 37, no. 22, pp. 4891–4907. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00373-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00373-4)
12. Pimentel J., McClellan O. *Hydrogen bond*. Moscow, 1964. 462 p. (in Russian).
13. Bartnev T. M., Zelenev Yu. V. *Physics and mechanics of polymers*. Moscow, 1983. 392 p. (in Russian).

Информация об авторах

Песецкий Степан Степанович – член-корресподент, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Кривогуз Юрий Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: yurikriv@tut.by.

Information about the authors

Pesetskii Stepan Stepanovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Krivoguz Yuri Mikhailovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Sector. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: yurikriv@tut.by.