

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 620.22:678.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-103-110>

Поступило в редакцию 19.08.2019
Received 19.08.2019

Член-корреспондент С. С. Песецкий, В. В. Дубровский, О. А. Макаренко

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*

УПРОЧНЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ПРИ НАПОЛНЕНИИ КОРОТКИМ СТЕКЛОВОЛОКНОМ И МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Аннотация. Исследовано влияние гибридного наполнения полиэтилентерефталата (ПЭТ) короткими стеклянными волокнами (СВ) и многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ) на статические и динамические механические свойства композитов, а также особенности структуры и текучесть расплавов. Компаундирование материалов осуществляли смешением в расплаве ПЭТ методом реакционной экструзии. Исследуемые композиты содержали от 15 до 60 мас. % СВ, концентрация МУНТ составляла 0,5 и 1,6 мас. %. Показано, что при гибридном наполнении ПЭТ наблюдается синергическое повышение прочности и модулей упругости композитов при растяжении и изгибе, а также динамического модуля сдвига в широком интервале температур. Добавки МУНТ интенсифицируют межфазную адгезию, оказывают нуклеирующее влияние на кристаллизацию связующего, повышают его термостабильность.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, короткое стекловолокно, многостенные нанотрубки, гибридное наполнение

Для цитирования: Песецкий, С. С. Упрочнение полиэтилентерефталата при наполнении коротким стекловолокном и многостенными углеродными нанотрубками / С. С. Песецкий, В. В. Дубровский, О. А. Макаренко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 103–110. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-103-110>

Corresponding Member Stepan S. Pesetskii, Vladislav V. Dubrovsky, Olga A. Makarenko

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

STRENGTHENING POLY (ETHYLENE TEREPHTHALATE) BY FILLING WITH SHORT GLASS FIBERS AND MULTI-WALL CARBON NANOTUBES

Abstract. The effect of hybrid filling of poly (ethylene terephthalate) (PET) with short glass fibers (GF) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the static and dynamic mechanical properties of composites, as well as the structural features and rheological behavior of melts were investigated. Compounding materials was carried out by the PET melt blending with the use of the reaction extrusion method. The studied composites contained from 15 to 60 wt. % GF, the concentration of MWCNTs was 0.5 and 1.6 wt. %. It was shown that the PET hybrid filling led to a synergistic increase in the strength, the elastic modulus and the dynamic shear modulus of composites under tension and bending in a wide temperature range. MWCNT additives intensified interfacial adhesion, had a nucleating effect on the crystallization of the binder, and increased its thermal stability.

Keywords: poly (ethylene terephthalate), short glass fiber, multi-walled carbon nanotubes, hybrid filling

For citation: Pesetskii S. S., Dubrovsky V. V., Makarenko O. A. Strengthening of poly (ethylene terephthalate) by filling with short glass fibers and multi-wall carbon nanotubes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 103–110 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-103-110>

Введение. В последние годы все большее внимание различных исследовательских центров привлекают технологии наполненных термопластичных композитов, в которых используются гибридные наполнители – смеси частиц нано- и микрометрических диапазонов размеров. В подобных системах может реализоваться синергический эффект улучшения отдельных свойств материалов [1]. В частности, при одновременном введении коротких волокон и наноразмерных частиц часто наблюдаются синергические эффекты, проявляющиеся в неаддитивном росте показателей прочностных свойств.

В качестве нанонаполнителей при этом могут использоваться, например, углеродные наночастицы (графен, углеродные нанотрубки, отдельные модификации технического углерода), диок-

сид кремния, наноглины, оказывающие активное структурообразующее и армирующее влияние на кристаллизующиеся термопласты. Эффективность гибридного нано- и микронаполнения уже подтверждена исследованиями по технологии композитов на основе полиамида 6 [2–5], полипропилена [6; 7], терморепактивных эпоксидных смол [8; 9] и других полимеров [10].

Особый интерес представляют исследования по гибриднему наполнению одного из наиболее крупнотоннажных термопластов, потенциально пригодного для конструктивных применений – полиэтилентерефталата. В [11; 12] исследовано влияние добавок коротких стеклянных волокон (СВ), вводимых из стеклоровинга, и терморасширенного графита (ТРГ) на структуру, реологические, статические и динамические механические свойства полиэтилентерефталата (ПЭТ). Компаундирование материалов в них осуществляли методом реакционной экструзии при использовании в качестве реактора-смесителя двухшнекового экструдера с односторонним вращением шнеков и секционной конструкцией материального цилиндра в присутствии модификатора гетероцепных термопластов. Показано, что при компаундировании в секции измельчения стеклоровинга наблюдается не только фрагментация СВ, но и интенсифицируется диспергирование агрегатов ТРГ, усиливающееся при повышении концентрации стекловолокон. Введение добавок ТРГ способствует повышению средней длины коротких СВ, диспергированных в матрице ПЭТ. По мере повышения концентрации наполнителей в композитах интенсифицируется деструкция макромолекул ПЭТ, что сопровождается снижением молекулярной массы связующего и повышением текучести расплавов, а также ускорением кристаллизации и ростом степени кристалличности полиэфира. Установлено синергическое повышение модуля упругости гибридно наполненных композитов по сравнению с составами, содержащими только отдельные наполнители. Полученные данные предопределяют необходимость проведения расширенных и многосторонних исследований по анализу структуры и свойств ПЭТ, армированного коротким СВ и разнообразными углеродными наночастицами.

Цель работы – исследование влияния гибридного наполнения ПЭТ коротким СВ и многостенными углеродными нанотрубками на статические и динамические механические свойства, а также особенности структуры и текучесть расплавов композитов.

Материалы и методы исследования. В работе применяли ПЭТ марки 8200 (ТУ РБ 03301552.001–95, $T_{пл} = 255$ °С, $[\eta] = 0,88$ дл/г) производства ОАО «Могилевхимволокно» и алюмоборосиликатный стеклоровинг марки ЕС13-2400Н-54С производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно» (ТУ РБ 300059047.051–2003, диаметр моноволокон 13 мкм). Использовали многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) марки NC 7000 (диаметр $\approx 9,5$ нм, средняя длина – 1,5 мкм, площадь поверхности – 250–300 м²/г) от фирмы Nanosyl (Бельгия). Перед введением в композиты производили обработку наночастиц МУНТ жидкофазным модификатором гетероцепных термопластов марки МГТ-Ж (ТУ ВУ 40084698.265–2014), содержащим в своем составе ароматический диизоцианат, являющийся адгезионно-активным удлинителем цепи для полиэфиров [11; 12]. Для интенсификации адгезионного взаимодействия макромолекул ПЭТ с поверхностью частиц обоих наполнителей часть модификатора МГТ-Ж, как и в [11; 12], вводили в объем ПЭТ на стадии реакционного смешения компонентов в расплаве. Стабилизатором термоокислительной деструкции ПЭТ служил Irganox В-561 производства BASF, ФРГ (смесь термостабилизатора Irganox 168 и антиоксиданта Irganox 1010 при их массовом соотношении 4 : 1). Составы исследуемых композитов приведены в табл. 1. Их, как и в [12], получали методом реакционной экструзии на экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 ($D = 35$ мм, $L / D = 40$, 10 независимо обогреваемых секций) с однонаправленным вращением шнеков. Предварительно подсушенный в вакууме стеклоровинг (остаточная влажность $\approx 0,15$ %) подавался в четвертую секцию материального цилиндра экструдера, снабженную кулачковыми элементами специальной конструкции для измельчения волокна. Гранулят высушенного до остаточной влажности $\approx 0,05$ % ПЭТ предварительно механически смешивали с МУНТ, МГТ-Ж и стабилизатором В-561 и подавали из загрузочного бункера в основную загрузочную секцию материального цилиндра экструдера. Из материального цилиндра расплав выходил в виде четырех стренг, которые после прохождения водяной ванны и охлаждения в ней гранулировали на грануляторе роторного типа. Далее полученный гранулят высушивали в вакууме до остаточной влажности

≈0,05 % и использовали для анализа показателя текучести расплава (ПТР), а также для получения экспериментальных образцов литьем под давлением на термопластавтомате EN-30 (производство Тайвань, объем впрыска 30 см³). Температура литья составляла 270 °С.

Т а б л и ц а 1. Составы исследуемых композитов

Table 1. Compositions of the studied composites

Номер состава Number of the composite	Обозначение состава Composition designation	ПЭТ, % PET, %	СВ, % GF, %		МУНТ, % MWCNT, %	МГТ-Ж, % MGT-ZH, %	В-561, % B-561, %	
			Расчетное значение Calculated value	Фактическое значение Real value				
<i>Составы без СВ</i>								
1.1	ПЭТ	98,6	0	0	0	1,2	0,2 % от веса ПЭТ во всех составах	
1.2	ПЭТ/УНТ–0,5 %	98,1	0	0	0,5	1,2		
1.3	ПЭТ/УНТ–1,6 %	97,0	0	0	1,6	1,2		
<i>Составы с расчетной [СВ] = 15 %</i>								
2.1	ПЭТ/СВ–15 %	83,6	15	14,5	0	1,2		
2.2	ПЭТ/СВ–15 %/УНТ–0,5 %	83,1	15	16,5	0,5	1,2		
2.3	ПЭТ/СВ–15 %/УНТ–1,6 %	82,0	15	14,6	1,6	1,2		
<i>Составы с расчетной [СВ] = 30 %</i>								
3.1	ПЭТ/СВ–30 %	68,6	30	28,9	0	1,2		
3.2	ПЭТ/СВ–30 %/УНТ–0,5 %	68,1	30	31,5	0,5	1,2		
3.3	ПЭТ/СВ–30 %/УНТ–1,6 %	67,0	30	30,3	1,6	1,2		
<i>Составы с расчетной [СВ] = 60 %</i>								
4.1	ПЭТ/СВ–60 %	38,6	60	52,8	0	1,2		
4.2	ПЭТ/СВ–60 %/УНТ–0,5 %	38,1	60	59,5	0,5	1,2		
4.3	ПЭТ/СВ–60 %/УНТ–1,6 %	37,0	60	57,0	1,6	1,2		

Примечание. Здесь и далее концентрация выражена в массовых процентах.

Note. Hereinafter, the concentration is expressed in weight percent.

Фактическое содержание СВ в образцах определяли прокаливанием композитов до постоянного веса при 700 °С на воздухе.

Показатели механических свойств определяли при использовании брусков 80 × 10 × 4 мм для испытания на изгиб по ГОСТ 4648–2014, а также лопаток типа 1ВА для испытаний методом растяжения в соответствии с ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 9550–81 при определении прочности и модуля упругости при растяжении соответственно. Испытания образцов проводили на универсальной разрывной машине INSTRON 5567 не ранее, чем через сутки после их изготовления. Деформацию при определении модулей упругости находили с помощью экстензометра.

Реологическое поведение расплавов материалов оценивали по значениям ПТР, определяемым на приборе 5MPCA (RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd., Великобритания) в соответствии с ГОСТ 11645–73 при температуре 265 °С и нагрузке 21,6 Н (диаметр капилляра 2,095 мм, длительность выдержки расплава в плавильном цилиндре прибора 4 мин).

Дифференциально-термический и термогравиметрический анализы материалов проводили в токе азота на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter, фирмы NETZSCH-Gerätebau GmbH (Германия), совмещенном с ИК-фурье спектрометром Bruker Optik (США). Анализируемые образцы массой 10 мг получали в виде срезов из средней части брусков, используемых для испытаний на изгиб, скорость нагрева составляла 10 °С/мин. Степень кристалличности (α) рассчитывали по площади эндотермического пика плавления за вычетом теплоты холодной кристаллизации по формуле $(\Delta H_{пл} - \Delta H_{хкр}) / H_{пл}^0 \cdot 1 / (1 - w)100 \%$, где $\Delta H_{пл}$ – теплота плавления исследуемого образца; $H_{пл}^0$ – теплота плавления ПЭТ со 100 %-ной кристалличностью, равная 140 Дж/г [13]; $\Delta H_{хкр}$ – теплота холодной кристаллизации образца; w – массовая доля неполимерных компонентов в образце.

Динамический механический анализ (ДМА) производили на приборе DMA 8000 фирмы Perkin Elmer (США) при частоте нагружения 1 Гц. Используемые образцы – бруски размером 40 × 5 × 2 мм

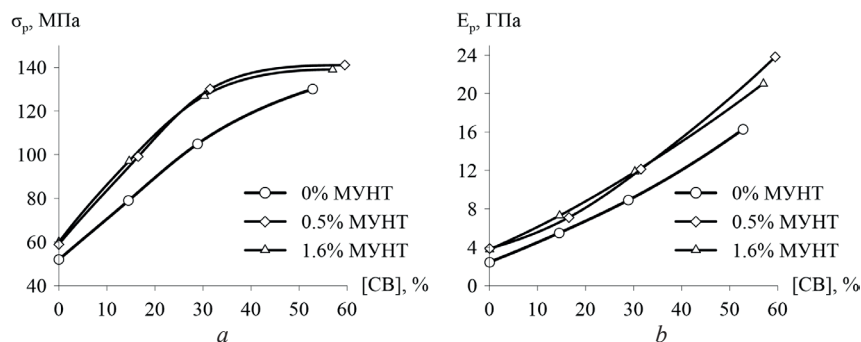


Рис. 1. Влияние концентрации СВ на прочность (a) и модуль упругости (b) при растяжении композитов

Fig. 1. Effect of GF concentration on strength (a) and elastic modulus (b) under tension of composites

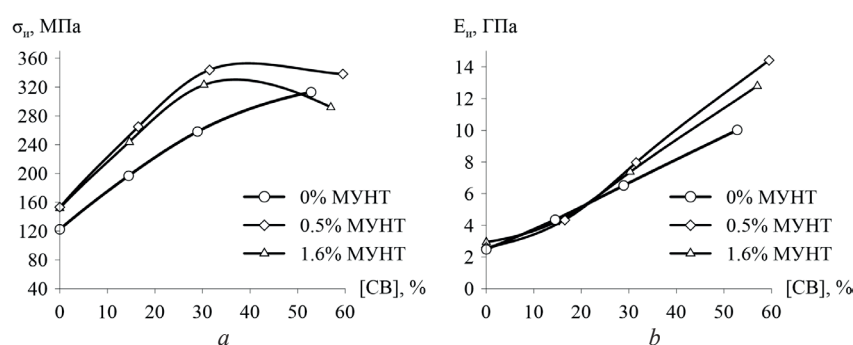


Рис. 2. Влияние концентрации СВ на прочность (a) и модуль упругости (b) при изгибе композитов

Fig. 2. Effect of GF concentration on strength (a) and elastic modulus (b) of the composites under bending

вырезали из рабочей части лопаток типа 1ВА ГОСТ 11262–2017. Испытания проводили в режиме консольного изгиба при деформации 0,05 мм и расстоянии между опорами 10 мм. Скорость нагрева образцов составляла 2 °С/мин.

Результаты и их обсуждение. Как видно из рис. 1, 2, использование гибридного наполнения приводит к выраженным эффектам упрочнения композитов при испытаниях методами растяжения и изгиба.

В табл. 2 приведены данные по количественной обработке термограмм материалов и значения параметров, характеризующих влияние наполнения на кристаллизацию, плавление, термостабильность и реологическое поведение расплавов материалов, а на рис. 3 – типичные кривые ДТА для ПЭТ, композитов ПЭТ/МУНТ (рис. 3, a), ПЭТ/СВ и ПЭТ/СВ/МУНТ (рис. 3, b).

Т а б л и ц а 2. Показатели реологических и морфологических свойств материалов

T a b l e 2. Indicators of rheological and morphological properties of materials

Номер состава Number of the composites	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	$T_{x\text{ крп}}, ^\circ\text{C}$ $T_{c\text{ ст}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{x\text{ крп}}, \text{Дж/г}$ $\Delta H_{c\text{ ст}}, \text{J/g}$	$T_{\text{пл}1}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{м}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \%$ $\alpha, \%$	$T_{\text{пл}2}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{нд}}, ^\circ\text{C}$	ΔW при $T = 480 ^\circ\text{C}, \%$ ΔW at $T = 480 ^\circ\text{C}, \%$
1.1	19,8	120,3	15,92	256,0	4,2	400,8	83,4
1.2	26,4	115,5	0,94	254,0	22,8	401,9	82,3
1.3	10,0	110,2	2,82	255,0	16,8	402,0	79,6
3.1	18,0	123,2	12,85	254,8	9,2	402,3	58,2
3.2	24,1	116,2	2,41	255,3	16,6	404,2	54,1
3.3	3,7	113,0	1,17	252,7	19,8	403,1	54,6

П р и м е ч а н и я: $T_{\text{нд}}$ – температура начала деструкции; ΔW – потери массы при нагреве до температуры 480 °С; остальные обозначения в тексте.

N o t e s: T_{bd} – temperature of the beginning of destruction; ΔW – mass loss during heating at temperature of 480 °С; the other designations in the text.

При растяжении жесткость, характеризуемая величиной модуля (E_p), и прочность (σ_p) возрастают с увеличением [СВ] для композитов ПЭТ/СВ/МУНТ примерно в равной степени для обеих концентраций МУНТ во всем интервале содержания волокон. При изгибе наиболее выраженный эффект упрочнения характерен для композитов с добавкой 0,5 % МУНТ (рис. 2, а).

Жесткость материалов при изгибе синергически повышается при [СВ] ≥ 30 %, причем более высокий уровень значений E_n композитов характерен для ПЭТ/СВ/МУНТ–0,5 %. Следует отметить, что если при изгибе достигается чрезвычайно высокая прочность ($\sigma_n = 352$ МПа для композита ПЭТ/СВ–30 %/УНТ–0,5 %), то при растяжении при предельно большой для данного эксперимента [СВ] ≈ 60 % гибридного композита зарегистрирована величина $E_p = 24$ ГПа, что более чем на один десятичный порядок превышает данный показатель для ненаполненного ПЭТ. Необходимо также отметить, что эффекты упрочнения для гибридно наполненных композитов ПЭТ/СВ/МУНТ заметно превышают таковые для материалов ПЭТ/СВ/ТРГ [11; 12]. При гибридном наполнении СВ и МУНТ, в отличие от материалов ПЭТ/СВ/ТРГ [12], удается обеспечить одновременно супервысокие жесткость и механическую прочность композитов.

Причиной проявления наблюдаемых эффектов могут быть интенсификация межфазной адгезии при введении добавок МУНТ, что установлено, например, для гибридно наполненных композитов ПА6/СВ/УВ [3], влияние нанотрубок на длину СВ, термостабильность и молекулярную структуру связующего.

Результаты по определению статических механических характеристик, приведенные на рис. 1, 2, получены при температуре испытаний 23 °С, когда аморфная фаза ПЭТ находится в застеклованном состоянии. Представляло научный и практический интерес оценить изменение механических характеристик, в частности жесткости, характеризуемой динамическим модулем сдвига (G'), в более широком интервале температур с помощью метода ДМА. На рис. 4 в качестве примера представлены типичные температурные зависимости тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) и динамического модуля сдвига (G') ПЭТ без наполнителей (состав 1.1) и гибридно наполненных композитов с [СВ] = 30 % (составы 3.1–3.3), а в табл. 3 – данные по количественной обработке релаксационных спектров. Из них видно, что величина G' гибридно наполненных композитов заметно превосходит таковую для бинарных систем ПЭТ/МУНТ и ПЭТ/СВ, причем в области температур выше 100 °С, когда полиэфир находится в высокоэластическом состоянии, эффект упрочнения выражен более ярко. Данный результат, несомненно, является следствием роста межфазной адгезии и ограничения вследствие этого молекулярной (сегментальной) подвижности полиэфира. Это заключение подтверждается также данными по уровню значений $\text{tg}\delta$ при температуре стеклования (T_g) ПЭТ (табл. 3). Пониженный уровень значений $\text{tg}\delta$ для композитов ПЭТ/СВ/МУНТ по сравнению с материалами ПЭТ/СВ однозначно указывает на ограничение сегментальной подвижности ПЭТ в них и интенсификацию межфазной адгезии.

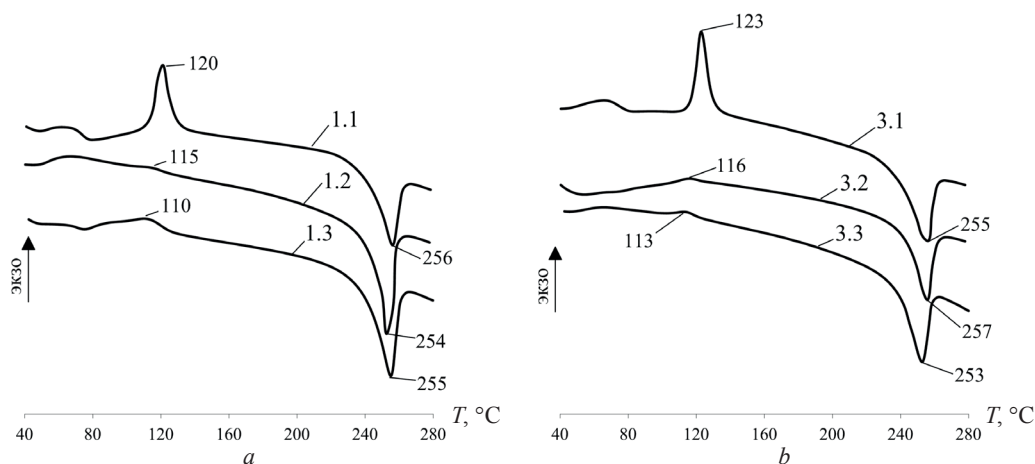


Рис. 3. Кривые ДТА материалов: ПЭТ и ПЭТ/МУНТ (а), ПЭТ/СВ и ПЭТ/СВ/МУНТ (б)

Fig. 3. DTA curves of the materials: PET and PET/MWCNT (a), PET/GF and PET/GF/MWCNT (b)

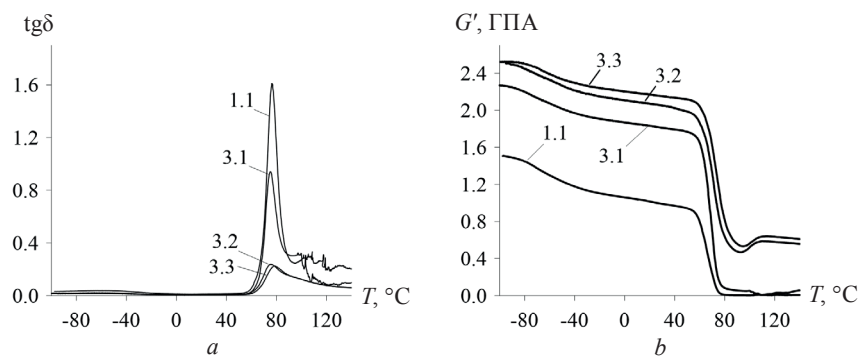


Рис. 4. Температурные зависимости $\tan\delta$ (a) и G' (b) материалов; обозначения кривых здесь и на рис. 3, а также составы в табл. 2, 3 соответствуют составам в табл. 1

Fig. 4. Temperature dependences of $\tan\delta$ (a) and G' (b) of the materials; the notation for the curves here in fig. 3 and in tables 2, 3 – numbers of the composites according to table 1

Т а б л и ц а 3. Влияние температуры на показатели релаксационных свойств композитов

Table 3. The effect of temperature on relaxation properties of the composites

Номер состава Number of the composites	$T_c, ^\circ\text{C}$ $T_g, ^\circ\text{C}$	Значение $\tan\delta$ при $T = T_c$ Value of $\tan\delta$ at $T = T_g$	Значения G' , ГПа, при температуре, $^\circ\text{C}$ Values of G' , GPa, at temperature, $^\circ\text{C}$				
			-75	-40	23	90	160
1.1	76,4	1,61	1,415	1,177	1,008	0,005	0,004
1.2	77,3	0,43	1,540	1,337	1,183	0,074	0,111
1.3	76,4	0,48	1,656	1,430	1,261	0,084	0,121
3.1	75,2	0,94	2,167	1,968	1,826	0,055	0,090
3.2	75,4	0,24	2,419	2,214	2,067	0,478	0,530
3.3	78,1	0,22	2,482	2,297	2,166	0,559	0,573

Повышенные значения G' в области высокоэластического состояния аморфной фазы ПЭТ свидетельствуют о росте деформационной теплостойкости гибридно наполненных материалов по сравнению с ПЭТ/СВ. Данные ДМА в целом свидетельствуют об интенсификации межфазной адгезии в системе наполнитель–связующее, от уровня которой в значительной степени зависит комплекс статических и динамических механических характеристик материалов.

Важно отметить сильное нуклеирующее влияние добавок МУНТ на кристаллизацию как исходного, так и наполненного коротким стекловолокном ПЭТ. Это проявляется, во-первых, в снижении температуры холодной кристаллизации ($T_{x\text{кр}}$) ПЭТ. Как видно из рис. 3, а и табл. 2, в условиях настоящего эксперимента $T_{x\text{кр}}$ чистого ПЭТ составляет $120,3^\circ\text{C}$, а в композитах ПЭТ/МУНТ–1,6 % она снижается на $10,1^\circ\text{C}$. Данный факт – несомненное следствие ускорения кристаллизации ПЭТ под влиянием добавок МУНТ. Важно отметить, что сильный нуклеирующий эффект на кристаллизацию ПЭТ от введения добавок МУНТ сохраняется и в композитах, содержащих СВ, что фиксируется по снижению значений $T_{x\text{кр}}$ и уменьшению теплоты холодной кристаллизации ($\Delta H_{x\text{кр}}$) по мере повышения [МУНТ] в композитах. И это невзирая на тот факт, что СВ также инициирует кристаллизацию ПЭТ [12].

Добавки МУНТ заметно не влияют на значения температуры плавления ($T_{\text{пл}}$) ПЭТ в композитах ПЭТ/МУНТ (табл. 2, составы 1.1–1.3) и гибридных композитах (табл. 2, составы 2.1–3.3). Данный результат свидетельствует о том, что модифицирующее влияние МУНТ распространяется, в основном, на аморфную фазу полиэфира. Кроме того, это косвенно указывает на достаточно высокую термостабильность связующего в гибридных композитах, что подтверждается сведениями о значениях температур начала деструкции и потерь массы при температуре 480°C (табл. 2). Следовательно, в отличие от добавок ТРГ [12], МУНТ не только не активируют деструкцию ПЭТ, но проявляют стабилизирующее действие. Термическая стабилизация полиэфира добавками МУНТ может быть одной из причин достижения высоких прочностных характеристик для гибридно наполненных композитов ПЭТ/СВ/МУНТ. Повышение термостабильности

матричного полиэфира фиксируется также по значениям ПТР расплавов материалов. Как видно из табл. 2, добавки 1,6 % МУНТ в гибридных композитах способствуют снижению текучести (росту вязкости расплава), хотя известно, что влажное СВ в композитах часто интенсифицирует деструкцию макромолекул ПЭТ, приводящую к снижению молекулярной массы и росту ПТР [14]. Полученный в настоящем сообщении результат по реологическому поведению композитов и термостабильности связующего может быть также одним из следствий удовлетворительной сушки наполнителей перед компаундированием.

Таким образом, при гибридном наполнении ПЭТ коротким стекловолокном и МУНТ удается получить композиты, обладающие одновременно высокими жесткостью и механической прочностью. Углубленное исследование подобных материалов позволит оптимизировать их составы и технологию и создавать композиты с рекордным уровнем показателей механических свойств.

Список использованных источников

1. Песецкий, С. С. Гибридное микро- и наноуплотнение конструкционных пластиков: синергизм армирующего действия / С. С. Песецкий // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 5.
2. Песецкий, С. С. Упрочнение полиамида 6 при гибридном наполнении коротким базальтовым волокном и науголиной / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Т. М. Содылева // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 74–83.
3. Морфология и свойства гибридных композитов ПА6 с короткими углеродными волокнами и органогиной / С. С. Песецкий [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 47–57.
4. Clifford, M. J. Fiber reinforced nanocomposites: Mechanical properties of PA6/clay and glass fiber/PA6/clay nanocomposites / M. J. Clifford, T. Wan // Polymer. – 2010. – Vol. 51, N 2. – P. 535–539. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.11.046>
5. Preparation and mechanical properties of injection moulded polyamide 6 matrix hybrid nanocomposite / L. Meszaros [et al.] // Composites Science and Technology. – 2013. – Vol. 75. – P. 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.11.013>
6. Pedrazzoli, D. Silica nanoparticles as coupling agents for polypropylene/glass composites / D. Pedrazzoli, A. Pegoretti // Composites Science and Technology. – 2013. – Vol. 76. – P. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.12.016>
7. Mechanical properties of injection-molded carbon fiber/polypropylene composites hybridized with nanofillers / Y. Arao [et al.] // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2013. – Vol. 55. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.08.002>
8. Improving the interfacial and mechanical properties of short glass fiber/epoxy composites by coating the glass fibers with cellylose nano crystals / A. Asadi [et al.] // Express Polymer Letters. – 2016. – Vol. 10, N 7. – P. 587–597. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.54>
9. Mucoz-Velez, M. F. Effect of fiber surface treatment on the incorporation of carbon nanotubes and on the micromechanical properties of a single-carbon fiber-epoxy matrix composite / M. F. Mucoz-Velez, A. Valadez-Gonzalez, P. J. Herrera-Franco // Express Polymer Letters. – 2017. – Vol. 11, N 9. – P. 704–718. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.68>
10. Improving fiber/matrix interfacial strength through graphene and graphene-oxide nano platelets / A. Pegoretti [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 139, N 1. – P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/139/1/012004>
11. Влияние гибридного наполнения коротким стекловолокном и терморасширенным графитом на структуру и свойства полиэтилентерефталата / В. В. Дубровский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 1. – С. 120–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-1-120-128>
12. Effect of hybrid filling with short glass fibers and expanded graphite on structure, rheological and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) / V. V. Dubrovsky [et al.] // Materials Today Communications. – 2018. – Vol. 17. – P. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.002>
13. Wunderlich, B. Equilibrium melting of flexible linear macromolecules / B. Wunderlich // Polym. Eng. Sci. – 1978. – Vol. 18, N 6. – P. 431–436. <https://doi.org/10.1002/pen.760180603>
14. О влиянии коротких стекловолокон на молекулярно-структурные параметры, механические и реологические свойства полиэтилентерефталата / В. В. Дубровский [и др.] // Материалы. Технологии. Инструмент. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 50–57.

References

1. Pesetskii S. S. Hibrid micro- and nanofilling of structural plastics: synergism of reinforcing. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymeric Materials and Technologies*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 5 (in Russian).
2. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Sodyleva T. M. Polyamide 6 reinforcement by hybrid short basalt fiber and organoclay filling. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 2, pp. 74–83 (in Russian).
3. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Dubrovskii V. V., Sodyleva T. M., Aderikha V. N., Usova V. N. Morphology and properties of PA6 hybrid composites filled with short carbon fibers and organoclay. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, 2016, vol. 2, no. 3. pp. 47–57 (in Russian). <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2016-2-3-47-57>

4. Clifford M. J., Wan T. Fibre reinforced nanocomposites: Mechanical properties of PA6/clay and glass fibre/PA6/clay nanocomposites. *Polymer*, 2010, vol. 51, no. 2, pp. 535–539. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.11.046>

5. Meszaros L., Deak T., Balogh G., Czvikovszky T., Czigany T. Preparation and mechanical properties of injection moulded polyamide 6 matrix hybrid nanocomposite. *Composites Science and Technology*, 2013, vol. 75, pp. 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.11.013>

6. Pedrazzoli, D., Pegoretti A. Silica nanoparticles as coupling agents for polypropylene/glass composites. *Composites Science and Technology*, 2013, vol. 76, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.12.016>

7. Arao Y., Yumitori S., Suzuki H., Tanaka T., Tanaka K., Katayama T. Mechanical properties of injection-molded carbon fiber/polypropylene composites hybridized with nanofillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 55, pp. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.08.002>

8. Asadi A., Miller M., Moon R. J., Kalaitzidou K. Improving the interfacial and mechanical properties of short glass fiber/epoxy composites by coating the glass fibers with cellolose nanocrystals. *Express Polymer Letters*, 2016, vol. 10, no. 7, pp. 587–597. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.54>

9. Mucoz-Velez M. F., Valadez-Gonzalez A., Herrera-Franco P. J. Effect of fiber surface treatment on the incorporation of carbon nanotubes and on the micromechanical properties of a single-carbon fiber-epoxy matrix composite. *Express Polymer Letters*, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 704–718. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.68>

10. Pegoretti A., Mahmood H., Pedrazzoli D., Kalaitzidou K. Improving fiber/matrix interfacial strength through graphene and graphene-oxide nano platelets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 139, no. 1, pp. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/139/1/012004>

11. Dubrovsky V. V., Aderikha V. N., Shapovalov V. A., Pesetskii S. S. Influence of hybrid filling with short glass fibers and thermally expanded graphite on the structure and properties of polyethyleneterephthalate. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 1, pp. 120–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-1-120-128>

12. Dubrovsky V. V., Shapovalov V. A., Aderikha V. N., Pesetskii S. S. Effect of hybrid filling with short glass fibers and expanded graphite on structure, rheological and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate). *Materials Today Communications*, 2018, vol. 17, pp. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.002>

13. Wunderlich B. Equilibrium melting of flexible linear macromolecules. *Polymer Engineering and Science*, 1978, vol. 18, no 6, pp. 431–436. <https://doi.org/10.1002/pen.760180603>

14. Dubrovsky V. V., Koval' V. N., Bogdanovich S. P., Pesetskii S. S. On influence of short glass fibers on molecular and structural parameters, mechanical and rheological properties of poly-ethylene terephthalate. *Materialy. Tekhnologii. Instrument [Materials. Technology. Tool]*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 50–57 (in Russian).

Информация об авторах

Песецкий Степан Степанович – член-корреспондент, 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.

Дубровский Владислав Викторович – науч. сотрудник. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: vlad.dubrovskii@gmail.com.

Макаренко Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: makarenko-mpri@tut.by.

Information about the authors

Pesetskii Stepan S. – 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 (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Dubrovsky Vladislav V. – Researcher. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: vlad.dubrovskii@gmail.com.

Makarenko Olga A. – Ph. D. (Engineering), Senior researcher. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: makarenko-mpri@tut.by.