

13,14,07,12

Механические и термические свойства нанокomпозиционных пленок на основе ароматического полиимиды и углеродных наноконусов

© И.В. Гофман¹, И.В. Абалов¹, В.Е. Юдин¹, В.Г. Тиранов²¹ Институт высокомолекулярных соединений РАН,
Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gofman@imc.macro.ru

(Поступила в Редакцию 16 сентября 2010 г.
В окончательной редакции 17 ноября 2010 г.)

Исследованы механические характеристики нанокomпозиционных пленок, полученных путем введения наночастиц нового типа — углеродных наноконусов в термостойкий полипиромеллитимид (полиимид ПИ). По мере увеличения концентрации наноконусов в пленке наблюдается последовательный рост модуля упругости и предела вынужденной эластичности материала. При повышении концентрации наночастиц вплоть до 15 vol.% не зарегистрировано явлений, свидетельствующих об их агрегации. Изучены процессы ползучести в нанокomпозиционных пленках с различными концентрациями наноконусов в широком диапазоне растягивающих напряжений и температур. Показано, что введение этих наночастиц в матрицу полиимиды ПИ стабилизирует поведение материала в условиях длительных воздействий механических нагрузок — с ростом концентрации наноконусов наблюдается последовательное снижение как уровня деформаций, реализуемых в процессе ползучести, так и интенсивности релаксационного процесса в материале. Введение наночастиц приводит к расширению температурного диапазона работоспособности пленок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-03-90005-Бел_а).

1. Введение

В последнее десятилетие работы по синтезу и исследованию полимер-неорганических наноматериалов стали едва ли не наиболее динамично развивающейся областью полимерного материаловедения. Работы по модификации полимерных материалов путем введения в них наночастиц охватывают широкий круг полимерных систем — от высокотермостойких пленок и блоков гетероциклоцепных полимеров до полимерных гидрогелей [1,2].

Пристальное внимание исследователей привлекают вопросы влияния наночастиц на характер механического поведения различных полимерных материалов. И среди полимерных систем различных классов, являющихся объектами таких исследований, неизменный интерес вызывают композиции на основе термостойких ароматических полиимидов (ПИ) [3]. Эти полимерные материалы характеризуются поистине уникальным комплексом предельно высоких показателей термо- и теплостойкости, превосходными механическими и электрическими характеристиками в сочетании с высокой химической и радиационной стойкостью, что сделало их незаменимыми в таких областях техники, как аэрокосмическая и авиационная, электроника и приборостроение, электротехника и другие. В целом ряде случаев неременным условием успешного использования таких материалов является высокий уровень механических свойств. Именно поэтому возможности дальнейшей модификации этих свойств

за счет введения в полиимидные матрицы различных наночастиц находятся в фокусе внимания исследователей.

В результате проведенных работ [4–9] удалось составить довольно полное представление о влиянии целого ряда наночастиц различных типов (разного химического состава — углеродных, оксидных, гидросиликатных, а также разной геометрии — нанослоев, нанотрубок, нановолокон и т.д.) на такие практически важные характеристики полиимидных материалов пленочного и блочного типа, как модуль упругости, предел пластичности, прочность, деформация до разрушения. Описано поведение полиимидных нанокomпозиционных материалов в простых режимах деформирования, таких как растяжение, сжатие, изгиб.

Гораздо более фрагментарный и несистематический характер носит полученная до настоящего времени информация о влиянии наночастиц на релаксационные характеристики полиимидных материалов — на характер поведения этих материалов под действием длительных механических нагрузок. Информация такого рода весьма интересна с научной точки зрения и важна в практическом плане для успешного прогнозирования поведения этих материалов в различных устройствах и механизмах.

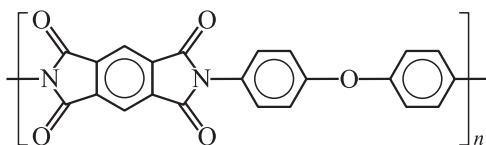
Другой задачей, весьма важной как с научной, так и с практической точки зрения, является исследование возможностей изменения механических свойств полиимидных нанокomпозитов за счет использования новых типов наномодификаторов. Одним из таких новых перспективных типов наночастиц являются углеродные на-

ноконусы (УНК), выпуск которых начат фирмой n-TEC (Норвегия). Эти наночастицы, реально являющиеся смесью наноконусов и нанодисков, отличаются термической стабильностью и высоким осевым отношением (до 100).

Целью настоящей работы было получение информации о механических свойствах нанокомпозиционных пленок, приготовленных путем введения различных количеств УНК в полиимидную матрицу, в условиях растяжения и ползучести. Также было исследовано влияние УНК на тепло- и термостойкость пленок.

2. Материалы и методики

В качестве матричного полиимидного материала в работе использованы пленки поли-4-4'-оксидифениленпиромеллитимида (полиимида ПМ).



Пленки получены двухстадийным методом [3] из растворов форполимера — поли-4-4'-оксидифениленпиромеллит-амидокислоты (ПАК) в диметилформамиде, синтезированных в ООО „Эстроком“ (Россия). Слои раствора ПАК отливали на стеклянные подложки с помощью щелевой фильеры с регулируемым зазором. Пленки ПАК получали сушкой отлитых слоев в воздушной атмосфере при 80°C в течение 2 h. Конверсию форполимерных пленок в полиимидные проводили термическим методом — путем нагрева пленок на подложках до температуры 360°C со скоростью 5 K/min с последующей выдержкой при этой температуре в течение 20 min.

Однородные дисперсии УНК в диметилформамиде получали с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-1, затем полученную дисперсию сливали с раствором ПАК и гомогенизировали смеси с помощью механической мешалки. Из приготовленных таким образом растворов получали нанокомпозиционные полиимидные пленки по описанной выше методике.

В процессе работы были приготовлены серии нанокомпозиционных пленок толщиной $25 \pm 5 \mu\text{m}$ с содержанием УНК до 15 vol.% (обозначения образцов с различными концентрациями наночастиц даны в таблице).

Механические испытания пленок в режиме одноосного растяжения проведены с помощью универсальной установки для механических испытаний UTS 10 (UTStestsysteme, Германия). В процессе испытаний определяли модуль упругости E , предел вынужденной эластичности σ_y (как точку пересечения касательных к начальному линейному участку деформационной кривой и к участку развития вынужденно-эластической деформации), прочность σ_b и предельную деформацию до разрушения ϵ_b . Указанные характеристики получены путем усреднения результатов испытания семи образцов.

Термомеханические испытания пленок для определения температур стеклования T_g проведены на установке УМИВ-3 („Точприбор“, Россия) в условиях нагрева образца с постоянной скоростью 5 K/min под действием стабилизированного растягивающего усилия 0.5 МПа.

Перечисленные выше испытания проведены на образцах в форме полос с размером рабочей части $2 \times 20 \text{ mm}$.

Релаксационные характеристики в режиме изотемпературной ползучести при одноосном нагружении определены с помощью лабораторного автоматического релаксометра деформаций на образцах в форме полос с размером рабочей части $2 \times 50 \text{ mm}$. Измерения деформации проводились в дискретном режиме.

Термогравиметрические испытания пленок проведены с помощью лабораторных термовесов при нагревании образца в самогенерируемой атмосфере со скоростью 5 K/min. По результатам испытаний определены показатели термостойкости исследуемых материалов τ_5 и τ_{10} — температуры, при достижении которых в ходе нагрева масса полимера уменьшается на 5 и 10%.

3. Результаты

Полиимид ПМ, использованный в нашей работе в качестве матричного полимера — слабоупорядоченный (степень кристалличности до 10%) ПИ с полужесткими макроцепями (гибкость сегментов обеспечивается за счет присутствия в элементарном звене полимера мостиковых атомов —O—). Пленки ПМ характеризуются высокой степенью плоскостной ориентации макроцепей, реализуемой в процессе их изготовления за счет ориентирующего действия подложки. Эти пленки широко применяются в различных отраслях техники, прежде всего как термо- и химически стойкий электроизоляционный и конструкционный материал [3,10] с высоким уровнем механических свойств (см. таблицу).

Тем более интересно рассмотреть возможности дальнейшего повышения уровня механических характеристик этого материала (в первую очередь — механической жесткости) за счет введения в пленку УНК.

Результаты механических испытаний нанокомпозиционных пленок (см. таблицу) свидетельствуют о существенном росте модуля упругости материала по мере повышения концентрации УНК в нем: введение 15 vol.% наночастиц приводит к росту модуля вдвое. При сравнении этих результатов с данными, полученными нами ранее при введении в тот же полимер наночастиц других типов [7], видно, что использование УНК в качестве наноаппендатора позволяет достичь более значительного роста модуля упругости, чем введение таких известных наночастиц, как монтмориллонит и углеродные нановолокна. Еще одним достоинством УНК по сравнению с другими наноаппендаторами, испытанными ранее [7], является возможность введения в полимер существенно более высоких концентраций наночастиц без наступления нежелательных эффектов их агрегации. Как видно из таблицы и рис. 1, последовательный рост модуля

Механические характеристики пленок нанокomпозиций ПМ–УНК

Обозначение образца	Концентрация УНК, vol.%	Свойства пленок				
		E , GPa	E/E_0	σ_y , МПа	σ_b , МПа	ε_b , %
УНК-0	0	2.61 ± 0.07	1	101 ± 3	148 ± 5	52 ± 4
УНК-1	1	2.94 ± 0.11	1.13	105 ± 3	127 ± 6	29 ± 3
УНК-3	3	3.31 ± 0.08	1.27	109 ± 3	121 ± 4	25 ± 2
УНК-5	5	3.63 ± 0.07	1.39	114 ± 3	117 ± 3	16 ± 2
УНК-7	7	4.04 ± 0.11	1.55	–	110 ± 4	9.4 ± 0.8
УНК-9	9	4.40 ± 0.13	1.69	–	98 ± 4	5.0 ± 0.3
УНК-12	12	4.85 ± 0.17	1.86	–	96 ± 2	4.1 ± 0.3
УНК-15	15	5.27 ± 0.19	2.02	–	105 ± 5	4.4 ± 0.3

упругости пленок продолжается при росте концентрации УНК вплоть до 15 vol.% (максимальная концентрация наночастиц, введенная в полимер в настоящей работе), в то время как для других типов наночастиц, вводившихся ранее [7], рост модуля прекращался из-за их интенсивной агрегации на уровне концентраций менее 10 vol.%.

Наряду с модулем упругости при росте концентрации УНК в композиции наблюдается рост предела вынужденной эластичности σ_y (см. таблицу).

Отметим, что введение УНК в пленку вплоть до максимальной концентрации (15 vol.%) не приводит к качественному изменению характера деформационного процесса — зависимости σ – ε (рис. 2). Нанокomпозиционные пленки, как и пленки исходного полиимида ПМ, деформируются однородно, без образования шейки и прочих явлений, свидетельствующих о локализации деформационного процесса (образование „трещин серебра“, полос сдвига). Преобладающим механизмом деформирования пленок этого полимера является вынужденно-высокоэластическая деформация [3]. Этот

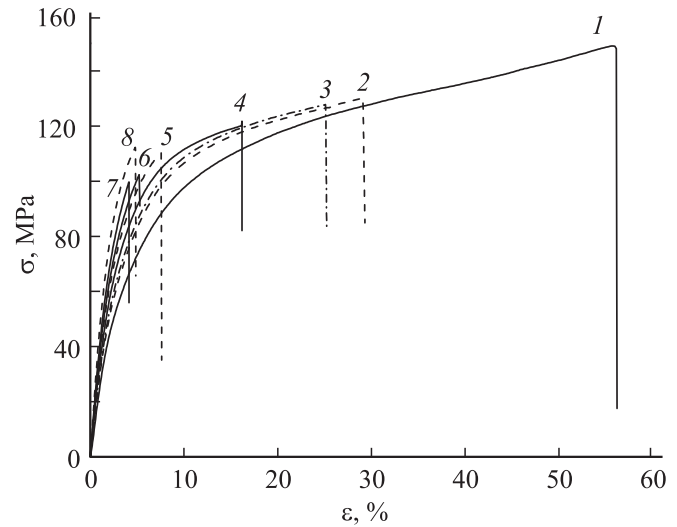


Рис. 2. Деформационные кривые пленок ПМ (1) и нанокomпозиций с концентрациями УНК 1 (2), 3 (3), 5 (4), 7 (5), 9 (6), 12 (7) и 15 vol.% (8).

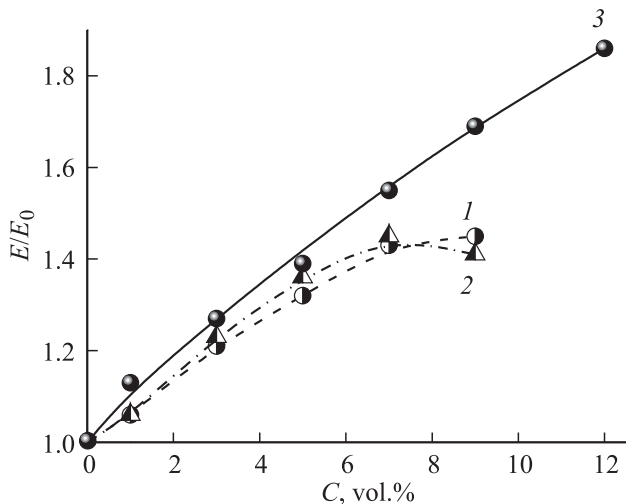


Рис. 1. Зависимость относительной величины модуля упругости E/E_0 от концентрации наночастиц для пленок композиций полиимида ПМ с различными наночастицами. 1 — углеродные нановолокна [7], 2 — монтмориллонит [7], 3 — УНК (данные таблицы).

же механизм обеспечивает деформирование и нанокomпозиций ПМ с УНК.

Деформация исходной полиимидной пленки — матрицы исследуемых нанокomпозиций — развивается в основном за счет конформационных изменений макромолекул при наличии мостиковых кислородных атомов. Введение же УНК приводит к заторможенности конформационных изменений и перераспределению внутреннего усилия с полугибких цепей на жесткие наночастицы наполнителя, что вносит свой вклад в эффект снижения предельной деформации нанокomпозитного материала в целом.

Уменьшение прочности композита по мере роста концентрации УНК может быть также связано с подобными эффектами, сопровождающими их введение в полимер — с гетерогенизацией структуры материала и дополнительной концентрацией напряжений на границах раздела фаз.

Последовательное (по мере роста концентрации наночастиц) снижение предельной деформации до разрушения (см. таблицу, рис. 2) является отрицательным

следствием введения УНК в пленки ПМ. Этот эффект, ранее описанный в литературе, наблюдался также при введении в полиимидные пленки наночастиц других типов — монтмориллонита, углеродных нановолокон и нанотрубок, гидросиликатных нанотрубок со структурой хризотила [7]. При этом интенсивность снижения величины ε_b по мере роста концентрации наполнителя примерно одинакова для различных наночастиц: так, в результате повышения концентрации каждой из перечисленных частиц в полимере до 7 vol.% величина ε_b падает \sim в 5 раз по сравнению с ненаполненной пленкой ПМ.

Таким образом, выбор оптимальной концентрации УНК в композите следует проводить с учетом как эффектов последовательного роста жесткости пленки по мере введения в нее наночастиц, с одной стороны, так и последовательного снижения предельной деформации, с другой стороны.

Интенсивный рост модуля упругости при повышении концентрации УНК и отсутствие заметного насыщения этой зависимости вплоть до существенных (15 vol.%) концентраций наполнителя свидетельствует о высокой однородности распределения наночастиц в матрице, достигнутой при изготовлении композиционных пленок. Этот же вывод следует из первых результатов электронно-микроскопического исследования композиционных пленок. На получаемых в ходе этой работы изображениях поверхности и поперечного сечения (хрупких сколов) композиционных пленок не обнаружено следов агломерации УНК.

Вместе с тем нужно констатировать, что зарегистрированный в наших экспериментах рост модуля упругости оказался скромнее, чем можно было бы ожидать исходя из данных о геометрических характеристиках УНК. В соответствии с теоретическими представлениями [11] для наночастиц слоевой геометрии с такими осевыми отношениями (20–100) уже при их концентрациях в полимере \sim 2–3 vol.% можно ожидать образования перколяционного кластера и „сквозного“ армирования полимерной матрицы наночастицами.

Можно предположить, что указанное несоответствие экспериментальных результатов теоретическим предсказаниям связано с недостаточно эффективным взаимодействием компонентов наноконпозиции. В настоящее время в литературе отсутствуют данные о характере взаимодействия УНК с полимерными матрицами, в которые они вводятся. Однако из технической информации, предоставляемой фирмой-изготовителем,¹ следует, что УНК — графитоподобные образования, по структуре поверхности весьма близкие к многослойным углеродным нанотрубкам (УНТ). Характер взаимодействия последних с полимерами изучен достаточно широко. Авторы обзора [12], подробно проанализировав этот вопрос, пришли к выводу о том, что для УНТ, не подвергнутых специальным поверхностным обработкам для компатибилизации с полимерными матрицами и предотвращения агрегации, взаимодействие с полимером ограничивается ван-дер-ваальсовыми силами. Для реализации более

¹ http://www.n-tec.no/en/Topmenu/Downloads/Technical_brochures.aspx

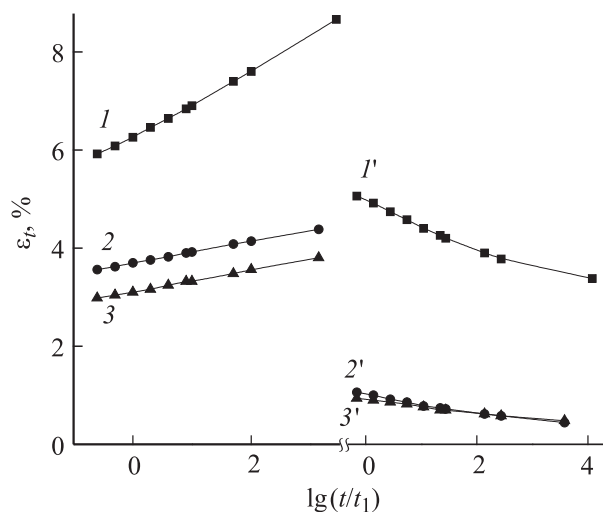


Рис. 3. Длительная ползучесть ($t = 24$ h) при напряжении 75 МПа (1–3) и последующее восстановление (1'–3') для пленок УНК-0 (1, 1'), УНК-3 (2, 2'), УНК-7 (3, 3').

сильных взаимодействий необходима предварительная активация поверхности УНТ с образованием на ней карбоксильных и гидроксильных групп. Видимо, та же ситуация складывается при введении в полимеры УНК. Определенная специфика взаимодействий может иметь место при введении УНК в полигетероароматические соединения, к которым относятся ароматические ПИ. В этом случае возможны специфические взаимодействия гексагональных структур поверхности УНК с ароматическими циклами полимерных макроцепей.

С учетом полученных нами результатов для наноконпозиций с участием УНК имеется вполне определенный „задел“ возможности дальнейшего повышения механических характеристик за счет предварительной поверхностной обработки УНК с целью ее активации.

Данные, полученные при испытании наноконпозиционных пленок на растяжение, использованы на следующем этапе работы — при планировании экспериментов по изучению процессов ползучести. В первую очередь это касалось выбора границ диапазона усилий, при которых проводились эксперименты — до \sim 0.7 от величины прочности испытываемой пленки.

На первом этапе этих исследований были проведены эксперименты в режиме ползучести ($\sigma = 75$ МПа, длительность 24 h) и последующего упругого восстановления — эластического восстановления такой же продолжительности на пленках исходного ПМ и наноконпозиций.

Полученные в этих экспериментах кривые ползучести $\varepsilon_t = f(t)$ (рис. 3) линеаризируются в полулогарифмических координатах. Соответственно процессы ползучести могут быть описаны функцией логарифмического вида

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 + b \lg(t/t_1), \quad (1)$$

где ε_t — деформация образца, развивающаяся к моменту времени t , ε_1 — деформация при $t = 1$ min (дефор-

мации — в %), b — параметр скорости процесса ползучести, который в общем случае определяется как $d\varepsilon/d\lg(t/t_1)$, t — текущее время, t_1 — базовое время (в наших опытах $t_1 = 1$ min).

Процесс эластического восстановления носит затухающий характер и при $t \rightarrow \infty$ деформация стремится к некоторому равновесному значению — необратимой деформации, накапливающейся как на стадии приложения нагрузки, так и в процессе ползучести. Величина этой деформации для пленок композиций ПМ с УНК не превышает 5% от полной деформации, развивающейся в процессе ползучести за 24 h, т.е. исследуемые нанокomпозиционные материалы характеризуются высоким уровнем обратимости деформаций.

Проведенные эксперименты ясно показали, что процессы ползучести в исследуемых материалах, как и в пленках многих полимеров, а также в большинстве высокоориентированных нитей [13], хорошо описываются функцией (1) в широком диапазоне времен и нагрузок. Поэтому в дальнейшем для сравнительного анализа процессов ползучести нанокomпозитных материалов проводились кратковременные эксперименты ($t = 10$ min), по результатам которых определяли параметры ε_t и b в выражении, описывающем исследуемый процесс.

Для выяснения механизмов деформации, реализуемых в процессе ползучести, были проведены эксперименты при различных растягивающих напряжениях (30–75 МПа) для пленок нанокomпозиций различного состава. Сравнение кривых ползучести, полученных при одном и том же напряжении на пленках с различным содержанием УНК, свидетельствует о том, что с ростом концентрации последних наблюдается последовательное снижение уровня деформаций, реализуемых в процессе ползучести. По мере роста концентрации УНК наблюдается также выраженное снижение интенсивности релаксационного процесса в материале — зависимость $\varepsilon = f(t)$ становится все слабее. Отметим, что все полученные в этих экспериментах зависимости полностью соответствуют уравнению (1).

Можно также отметить, что характеристики процесса ползучести, реализуемого при малых напряжениях, слабо зависят от концентрации наночастиц в испытываемых пленках, однако по мере роста растягивающего напряжения зависимость деформации в процессе ползучести от состава нанокomпозиции проявляется все более отчетливо.

Детальный анализ зависимости кривых ползучести от величин приложенного к образцу напряжения проведен для УНК-0 и УНК-12 (рис. 4). В широком диапазоне нагрузок (до 80–90 МПа для УНК-0 и при всех реализованных в работе напряжениях — до 75 МПа для УНК-12) кривые ползучести описываются формулой (1). При повышенных напряжениях, приложенных к пленкам исходного ПМ (УНК-0), в них наблюдается отклонение от линейного характера процесса ползучести. Это может быть связано с активирующим действием нагрузки, приводящим к ослаблению межмолекулярного взаимо-

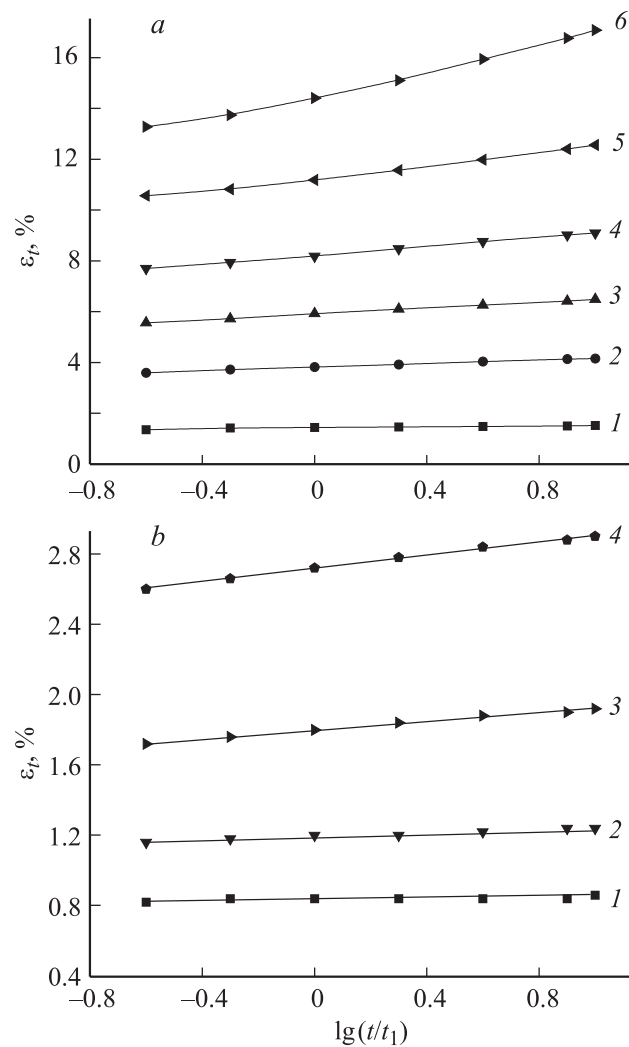


Рис. 4. а) Кривые ползучести пленок УНК-0 при напряжениях 30 (1), 60 (2), 75 (3), 82 (4), 98 (5) и 105 МПа (6). б) Кривые ползучести пленок УНК-12 при напряжениях 30 (1), 45 (2), 60 (3) и 75 МПа (4).

действия и ускорению процессов конформационных перестроек макромолекул [13]. Рис. 4 наглядно демонстрирует также существенное (более чем в 2 раза) снижение деформаций, реализуемых в процессе ползучести при одних и тех же нагрузках в композиционном материале по сравнению с однокомпонентной пленкой ПМ.

Зависимость параметра скорости ползучести b от напряжения σ для пленок с разным содержанием УНК представлена на рис. 5. Видно, что для исходной полиимидной пленки (УНК-0) повышение растягивающего напряжения вызывает существенный рост b , а по мере увеличения концентрации УНК в пленке эта зависимость становится все слабее. Аналогичным образом меняется с ростом концентрации УНК зависимость ε_1 от σ .

Для подтверждения предположения об активирующем действии внешних факторов на исследуемые процессы были проведены эксперименты в режиме изо-

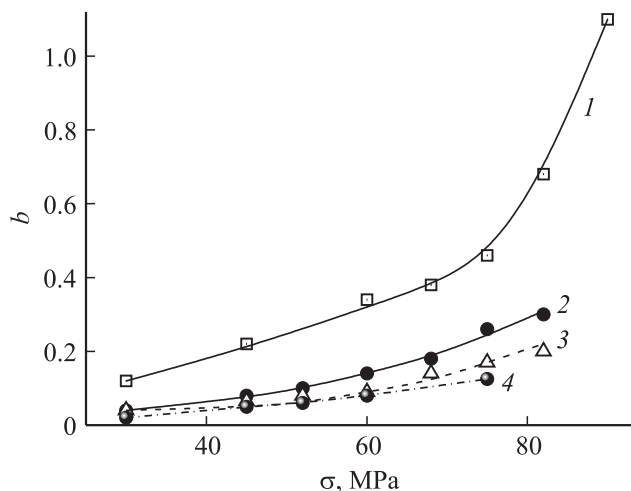


Рис. 5. Зависимость параметра скорости ползучести b от напряжения для УНК-0 (1), УНК-3 (2), УНК-7 (3) и УНК-12 (4).

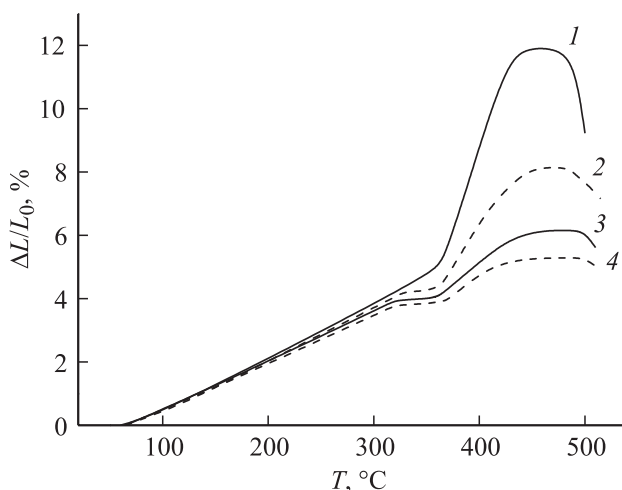


Рис. 6. Термомеханические кривые пленок ПМ (1) и наноконпозиций с содержанием УНК 3 (2), 5 (3) и 9 vol.% (4) при напряжении 0.5 МПа.

термической ползучести при различных температурах (20–250 °С) для пленок УНК-0 и УНК-12. При температурах 200 °С и выше наблюдается некоторое отклонение процесса ползучести от линейного характера, описываемого зависимостью (1). Последнее косвенным образом свидетельствует о том, что процесс ползучести как в пленках матричного ПИ, так и в исследованных наноконпозициях осуществляется за счет конформационных переходов, скорость которых увеличивается с ростом температуры.

Поскольку объекты исследования — пленки на основе полимера, отличающегося предельно высокими показателями тепло- и термостойкости, весьма важно было исследовать характер влияния УНК на эти характеристики изучаемых материалов.

Известно [3], что верхняя температурная граница диапазона работоспособности пленки ПМ определяется

температурой стеклования этого полимера $\sim 365^\circ\text{C}$. В ходе работы проведены термомеханические испытания композиционных пленок с концентрациями УНК до 12 vol.% и по результатам этих испытаний определены температуры стеклования композиций. Установлено, что присутствие УНК в полимерной матрице не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на величину T_g материала: для всех испытанных композиций получены значения $T_g = 364 \pm 2^\circ\text{C}$. Однако по мере повышения концентрации УНК в полимере меняется сам вид термомеханической кривой (рис. 6): происходит постепенное снижение масштабов разоруживания сегментальной подвижности макроцепей при переходе в расстеклованное состояние (изменение наклона кривой $\Delta L/L_0 = f(T)$ при переходе через T_g). Для немодифицированной пленки (УНК-0) наблюдается выраженный рост сегментальной подвижности в расстеклованном состоянии и соответственно существенный рост податливости материала, препятствующий его дальнейшему практическому использованию. А присутствие УНК приводит к столь заметному ограничению роста податливости при переходе через T_g , что для композиционных пленок, содержащих более 5 vol.% наночастиц, этот рост практически отсутствует (рис. 6), и материал можно продолжать использовать при температурах выше T_g в режимах, не связанных с воздействием на него экстремально высоких механических нагрузок.

Показатели термостойкости τ_5 ($505 \pm 5^\circ\text{C}$) и τ_{10} ($535 \pm 4^\circ\text{C}$) практически одинаковы для исходной пленки ПМ и для пленок с концентрациями УНК до 15 vol.%.

Таким образом, можно констатировать, что введение УНК в матрицу ПМ расширяет диапазон работоспособности материала до температур, соответствующих началу процесса термодеструкции, а сам этот процесс протекает в одном и том же диапазоне температур для композиций с содержанием наночастиц до 15 vol.%.

4. Заключение

Проведенный комплекс исследований показал перспективность введения УНК в матрицу ароматического ПИ как способа приготовления новых наноконпозиционных материалов. Полученные пленочные материалы характеризуются повышенным уровнем механической жесткости и высокой тепло- и термостойкостью.

Повышение жесткости (модуля упругости и предела пластичности) материала по мере роста концентрации наночастиц сопровождается достаточно интенсивным снижением предельной деформации до разрушения, так что оптимальную концентрацию УНК, вводимых в матрицу ПИ, следует выбирать с учетом обоих этих процессов.

Еще одним положительным следствием введения УНК в матрицу ПМ, зафиксированным в работе, является снижение интенсивности процессов ползучести в материале. Этот эффект важен с практической точки

зрения, поскольку он позволяет стабилизировать размеры пленочного образца в ходе длительного действия механических нагрузок.

Введение наночастиц в матрицы ароматического ПИ практически не сказывается на температурах физических переходов и показателях интенсивности термодеструкции, однако приводит к существенному снижению интенсивность роста податливости пленок при переходе через температуру стеклования, за счет чего диапазон работоспособности материала можно расширить до начала процессов термодеструкции.

Список литературы

- [1] F. Hussain. *J. Comp. Mater.* **40**, 1511 (2006).
- [2] H. Kasgöz, A. Durmus. *Polym. Adv. Technol.* **19**, 838 (2008).
- [3] М.И. Бессонов, М.М. Котон, В.В. Кудрявцев, Л.А. Лайус. Полиимиды — класс термостойких полимеров. Наука, Л. (1983). 328 с.
- [4] S.M. Delozier, R.A. Orwoll, J.F. Cahoon, J.S. Ladislaw, J.G. Smith, J.W. Connell. *Polymer* **43**, 813 (2002).
- [5] J.-H. Chang, D.-K. Park, K.J. Ihn. *J. Appl. Polym. Sci.* **84**, 2294 (2002).
- [6] H. Cai, F. Yan, Q. Xue. *Mater. Sci. Eng. A* **364**, 94 (2004).
- [7] И.В. Гофман, В.М. Светличный, В.Е. Юдин, А.В. Добродумов, А.Л. Диденко, И.В. Абалов, Э.Н. Корыткова, А.И. Егоров, В.В. Гусаров. *ЖОХ* **77**, 1075 (2007).
- [8] V.E. Yudin, V.M. Svetlichnyi, A.N. Shumakov, R. Schechter, H. Harel, G. Marom. *Composites A: Appl. Sci. Manufactur.* **39**, 85 (2008).
- [9] V.E. Yudin, J.U. Otaigbe, V.M. Svetlichnyi, E.N. Korytkova, O.V. Almjashaeva, V.V. Gusarov. *Express Polymer Lett.* **2**, 485 (2008).
- [10] Polyimides and other high temperature polymers / Ed. K.L. Mittal. Plenum Press, N.Y.-London (2005).
- [11] E.J. Garboczi, K.A. Snyder, J.F. Douglas, M.F. Thorpe. *Phys. Rev. E* **52**, 819 (1995).
- [12] X.-L. Xie, Y.-W. Mai, X.-P. Zhou. *Mater. Sci. Eng.* **49**, 89 (2005).
- [13] В.Г. Тиранов. Автореф. докт. дис. Ин-т текстильной и легкой промышленности, Л. (1981).