

Сравнительные характеристики продуктов переработки плавких сополи(уретан-имидов) из образованных ими растворов и расплавов

Comparative characteristics of products of processing of fusible copoly(urethane-imides) from the solutions and melts formed by them

А.Л. ДИДЕНКО, А.Г. ИВАНОВ, В.Е. СМЕРНОВА, Г.В. ВАГАНОВ, Е.Н. ПОПОВА,

Д.А. КУЗНЕЦОВ, Л.А. МЯГКОВА, В.М. СВЕТИЧНЫЙ, В.Е. ЮДИН, В.В. КУДРЯВЦЕВ

A.L. DIDENKO, A.G. IVANOV, V.E. SMIRNOVA, G.V. VAGANOV, E.N. POPOVA, D.A. KUZNETSOV,

L.A. MYAGKOVA, V.M. SVETLICHNIY, V.E. YUDIN, V.V. KUDRYAVTSEV

Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

Institute of Macromolecular Compounds of RAS, Saint-Petersburg, Russia

vanilin72@yandex.ru

При формовании из растворов и расплавов мультиблочных (сегментных) сополи(уретан-имидов) получены самонесущие пленки и толстостенные молдинги (лопатки). Исходные сополи(уретан-имиды) получали на основе алифатических полиэфиров: поли(пропиленгликоля), поли(диэтиленгликольадипината) и поликапролактона, диангидрида 1,3-бис(3',4'-дикарбоксифенокс)бензола и ароматических диаминов: 4,4'-бис-(4''-аминофенокс)бифенила и 1,4-бис(4'-аминофенокс)дифенилсульфона. Образцы пленок и молдингов исследованы методами ИК-спектроскопии, ТГА, ДСК и механического анализа в статических и динамических (ДМА) условиях эксперимента. Предполагается, что различия в свойствах пленок и молдингов обусловлены возрастанием доли ароматических блоков вследствие микродеструкции полимерных цепей и усилением межфазных взаимодействий полиэфирных и уретанимидных микрофаз (блоков) в полимерных системах при переработке полимеров из расплава методом литья под давлением.

Ключевые слова: сополи(уретан-имид), полиимид, полиуретан, пленки, молдинги, термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), динамический механический анализ (ДМА), температура стеклования, кривая растяжения, теплостойкий эластомер, термоэластопласт

Self-supporting films and thick-walled moldings (blades) were obtained from solutions and melts of multiblock (segmental) copoly(urethane-imides). The initial copoly(urethane-imides) were obtained on the basis of aliphatic polyesters: poly(propyleneglycol), poly(diethyleneglycoladipinate) and polycaprolactone, dianhydride of 1,3-bis(3',4'-dicarboxyphenoxy) benzene and aromatic diamines: 4,4'-bis-(4''-aminophenoxy)biphenyl and 1,4-bis(4'-aminophenoxy)diphenylsulfone. Samples of films and moldings were studied by IR spectroscopy, TGA, DSC and mechanical analysis under static and dynamic (DMA) experimental conditions. It is assumed that the differences in the properties of films and moldings are due to an increase in the proportion of aromatic blocks due to microdestruction of polymer chains and increased interfacial interactions of polyester and urethanamide microphases (blocks) in polymer systems during the processing of polymers from the melt by injection molding.

Keywords: copoly(urethane-imide), polyimide, polyurethane, films, moldings, thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), dynamic mechanical analysis (DMA), glass transition temperature, tensile curve, heat-resistant elastomer, thermoplastic elastomer

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-9-10-20-24

Введение

На основе полиимидов разработаны практически все типы технических материалов (покрытия, пленки, пластмассы, волокна, пены и пр.), способные к работе в экстремальных условиях [1, 2]. Наиболее значимыми продуктами модификации полиимидов являются полиамидоимиды [3], мультиблочные (сегментные) сополи(эфир-имиды) [4] и сополи(уретан-имиды) [5]. Сополи(уретан-имиды) в последние годы приобрели самостоятельное значение и нашли применение в качестве эластомеров повышенной теплостойкости и механической прочности [6] и материалов для изготовления перепарационных мембран [7, 8]. Основные методы синтеза сополи(уретан-имидов) приведены в обзоре [9, 10]. Сополи(уретан-имиды) по своей архитектуре относятся к мультиблочным (сегментным) сополимерам [11–14], составленным из несовместимых термодинамически гибких блоков алифатических полиэфиров и жестких блоков ароматических имидов. В некоторых пределах сополи(уретан-имиды) сочетают свойства, характерные для полиуретанов (эластомеров) и термопластов (полиимидов) [15].

В результате модификации термопластичных полиимидов звеньями алифатических уретанов получено представительное семейство сополи(уретан-имидов), которые по своим свойствам представляют собой высокотеплостойкие эластомеры [16–22]. Переходы стеклования указанных сополи(уретан-имидов) лежат в области отрицательных по шкале Цельсия температур. На кривых ДМА видны области практической независимости динамического модуля эластичности от температуры. В ряде случаев метод ДМА фиксирует наличие в системах микрообластей, в которых частично совместимы блоки гибкой и жесткой фазы. Полученные сополи(уретан-имидные) пленки характеризуются высокими значениями удлинения при разрыве. При варьировании в сополимерах различных по протяженности и химическому составу ароматических и алифатических блоков наблюдается изменение вида (хода) кривых растяжения пленок от характерного для эластомеров к близкому для термопластов [13, 14, 16–22].

В последние годы исследователи проявляют интерес к термоэластопластам [23]. По определению, к термоэластопластам относят эластомеры (полимерные соединения или полимерные смеси),

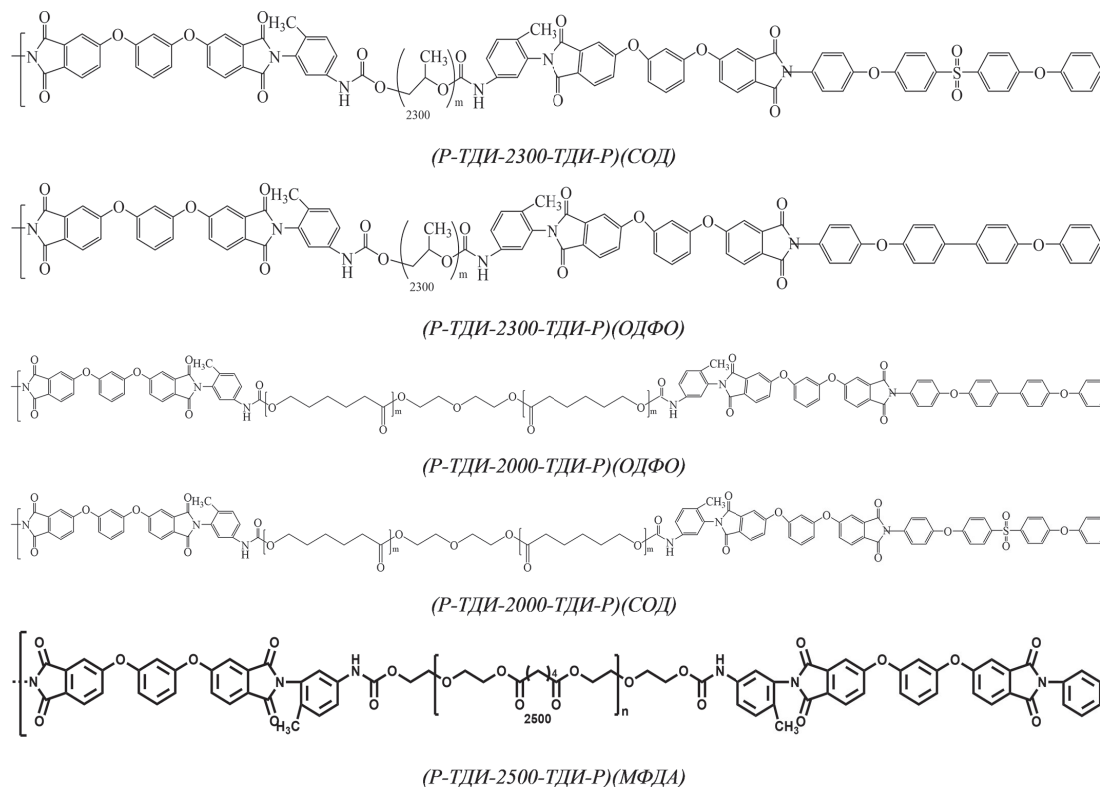


Схема 1.

образующие при нагревании расплавы, из которых возможно формовать готовые изделия без сшивания полимеров в процессе формования, притом что полученные изделия при температурах эксплуатации обладают свойствами эластомеров и их можно перерабатывать вторично. Задача представленной работы состоит в сопоставлении свойств пленок и молдингов, с тем чтобы выявить, насколько температура и сдвиговые усилия при переработке сополимеров влияют на эластические (вязкоупругие) свойства молдингов. Вопрос о различиях в свойствах продуктов переработки сополи(уретан-имидов) различающимися методами поднимался нами ранее в [16].

Экспериментальная часть Материалы

В синтезах сополиполи(уретан-имидов) использовали полиэфиры: поли(пропиленгликоль) с молекулярной массой 2300 г/моль (далее 2300), и поликапролактон с молекулярной массой 2000 г/моль (далее 2000) и поли(диэтиленгликольадипинат) с молекулярной массой 2500 г/моль (далее 2500); 2,4-толуилendiизоцианат (далее ТДИ), диангидрид 1,3-бис(3',4'-диарбоксифенокси)бензола (далее Р); диамины: 4,4'-бис-(4''-аминофенокси)бифенил (далее ОДФО) 1,4-бис(4'-аминофенокси)дифенилсульфон (далее СОД) и метафенилендиамин (далее МФДА). Растворитель N-метил-2-пирролидон (МП) осушали над гидридом кальция и перегоняли.

Синтез сополимеров

Сополи(уретан-имиды) получали по приведенным в работах [13, 14, 16–22] методикам. На схеме 1 приведены структурные формулы и обозначения полученных и исследованных в работе сополи(уретан-имидов).

Пленочные образцы приготавливали методом полива образовавшегося в процессе синтеза раствора сополи(уретан-имиды) в МП на гидрофобизованные стеклянные подложки, высушивали и отверждали нагреванием по ступенчатому режиму до 160°C. Пленки снимали с подложек, погружая в горячую воду. Толщина пленок составляла 60 мкм.

Образцы молдингов (в форме лопаток) получали при переработке пресс-порошков, приготовленных при высаживании полимера из образовавшегося в процессе синтеза раствора сополи(уретан-имиды) в МП в 50%-ный водный этиловый спирт. Высаженный полимер отфильтровывали и высушивали. Лабораторные блочные образцы сополи(уретан-имидов) приготавливали в виде лопаток, для чего исходный пресс-порошок загружали в микроэкструдер DSM Xplore (Нидерланды) и проводили гомогенизацию расплава в течение 5 мин с целью удаления пузырьков воздуха. Затем расплав

полимера загружали в литьевую машину и осуществляли впрыск расплава в пресс-форму. Образцы лопаток имели характерные размеры: 2 мм в толщину, 4 мм в ширину с длиной рабочей части 20 мм.

Методы исследования

ИК-спектры образцов регистрировали на Фурье-спектрометре IRAffinity-1S (Shimadzu, Япония) в средней ИК-области (700–4000 см⁻¹) с использованием микроприставки MIRacle (PIKE Technologies, USA) однократного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) снимали на термомикровесах TG 209 F1 (NETZSCH, Германия) в диапазоне температур от 30°C до 800°C при скорости нагрева 10°C/мин в инертной среде (аргон). Вес образцов составлял 2–3 мг.

Температурные переходы стеклования и плавления образцов сополимеров определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) при скорости нагрева 10°C/мин в диапазоне температур от -60°C до 300°C в инертной среде (аргон). Вес образцов 4–5 мг. Применительно к исследуемым сополимерам метод ДСК характеризует процессы плавления микрокристаллической фазы, образованной блоками алифатических полиэфигов.

Температурные зависимости динамических величин – модуля упругости E' , модуля потерь E'' и тангенса угла механических потерь $\tan\delta$ образцов – были получены методом динамического механического анализа (ДМА) на установке DMA 242 C (NETZSCH, Германия). Измерения проводились на частоте 1 Гц, скорость подъема температуры 5°C/мин, амплитуда деформации при испытании пленок в режиме растяжения – 0,1%, образцы молдингов испытаны в режиме двухплечевого изгиба. Температуру стеклования образцов определяли по температуре максимума $\tan\delta$.

Деформационно-прочностные свойства пленок и лопаток (модуль при растяжении, прочность на разрыв и деформацию при разрушении образца) определяли на установке Instron 5943 (США). Испытывались образцы пленок в виде полос шириной 2 мм и длиной рабочей части 25 мм. Размеры лопаток указаны выше. Скорость растяжения образцов в виде пленок и лопаток – 100 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Синтезированные поли(уретан-имидные) пленки и молдинги были охарактеризованы методом ИК-спектроскопии в частотном диапазоне 3500–700 см⁻¹. В качестве примера на рис. 1 представлены ИК-спектры образцов пленок сополи(уретан-имидов) с полипропиленоксидным (2300) и поли(диэтиленгликольадипинатным) (2500) гибкими блоками.

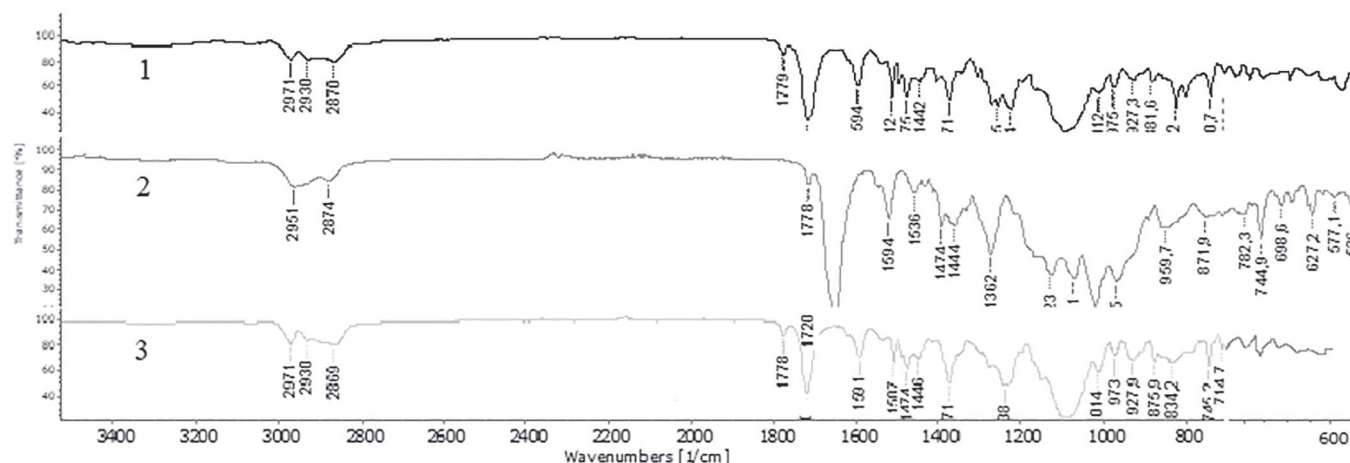


Рис. 1. ИК-спектры пленочных образцов полимеров: кривая 1 – (Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(ОДФО), кривая 2 – (Р-ТДИ-2500-ТДИ-Р)(МФА) и кривая 3 – (Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(СОД) с гибким полипропиленоксидным 1, 3 – (2300) и 2 – поли(диэтиленгликольадипинатным) (2500) блоками.

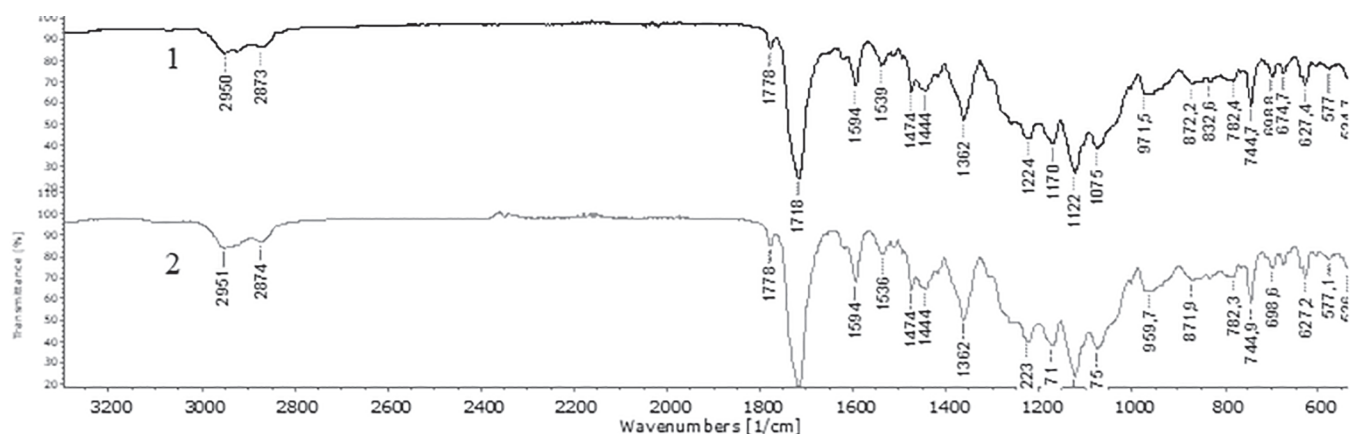


Рис. 2. ИК-спектры полимера (Р-ТДИ-2500-ТДИ-Р)(МФА) в форме молдинга (кривая 1) и пленки (кривая 2).

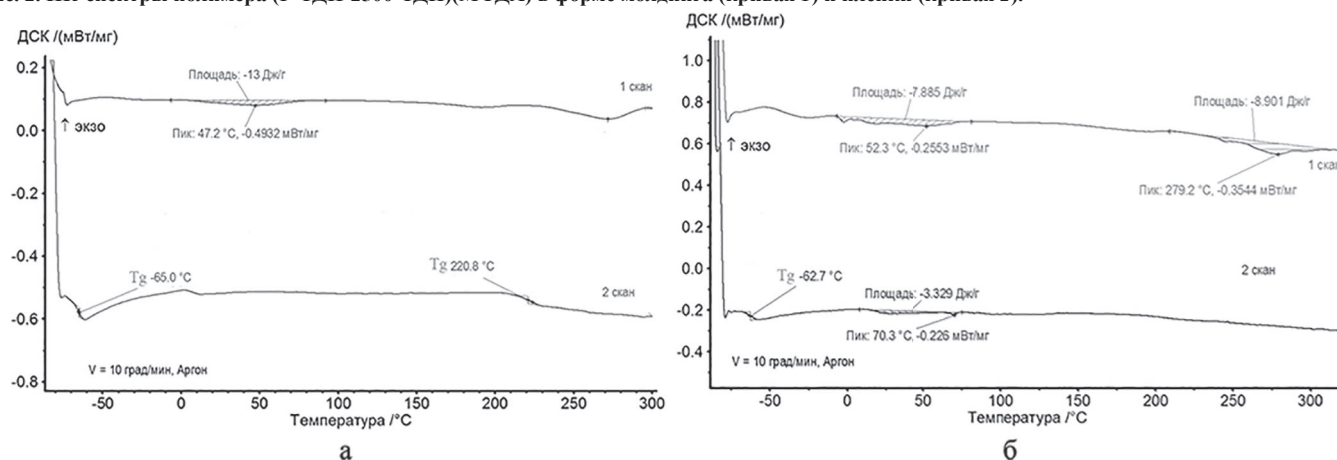


Рис. 3. Кривые ДСК образцов пленки (а) и молдинга (б) сополи(уретанимида) (Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(ОДФО).

В области 3300–3400 см⁻¹ представленных спектров присутствуют полосы, соответствующие валентным колебаниям вторичных аминогрупп (уретановый фрагмент). Уширенный характер этих полос указывает на возможное участие этих групп в образовании водородных связей. В диапазоне 3030–3100 см⁻¹ в спектрах присутствуют полосы валентных С–Н колебаний ароматических диаминов и диангидридов. Полосы валентных С–Н колебаний алифатического фрагмента сополи(уретан-имидов) обнаруживаются в области 2850–2970 см⁻¹. Валентные С=О колебания в имидных циклах подтверждаются наличием полос в области 1775–1780 и 1718–1721 см⁻¹, отвечающих асимметричным и симметричным колебаниям, соответственно. Валентные колебания С=О групп в уретановом фрагменте проявляются в виде плеча полосы в области 1690–1705 см⁻¹ для несвязанных водородной связью групп и 1618–1622 см⁻¹ для связанных С=О групп. Отсутствие полос при 1650–1660 см⁻¹ указывает на отсутствие свободных амидокислотных звеньев в полимерных цепях, а следовательно, на высокую степень имидизации синтезированных поли(уретан-имидов). Полосы средней интенсивности, лежащие в интервалах 1600–1575 см⁻¹ и

1525–1475 см⁻¹, отвечают С–С колебаниям ароматических колец. Широкая полоса с максимумом в области 1100 см⁻¹ соответствует симметричным валентным колебаниям С–О простой эфирной связи алифатического сегмента.

Было интересно проследить влияние на ИК-спектр предыстории образца. На рис. 2 представлены в качестве примера ИК-спектры образца (Р-ТДИ-2500-ТДИ-Р)(МФА) в форме пленки и молдинга. Видно отсутствие существенных отличий в данных спектрах, что указывает на отсутствие изменений химической структуры полимеров в процессе переработки пресс-порошков в жестких условиях. Однако небольшие увеличения относительной интенсивности полос колебаний, главным образом, ароматических колец, уретановых групп и имидных циклов в спектре молдинга наводят на мысль о снижении в случае молдинга относительного содержания алифатических блоков в сравнении с ароматическими блоками.

Сравнение термостойкости образцов пленок и молдингов, приготовленных при переработке одних и тех же исходных сополи(уретан-имидов), можно сделать по данным табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования пленок и молдингов методами ТГА и ДСК.

Сополи(уретан-имид)	пленки				молдинги			
	$\tau_5, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$ (1 ск)	$\Delta H, \text{Дж/г}$	$T_g, ^\circ\text{C}$ (2 ск)	$\tau_5, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$ (1 ск)	$\Delta H, \text{Дж/г}$	$T_g, ^\circ\text{C}$ (2 ск)
(Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(СОД)	347	53,7	9,86	-57,6	346	—	—	-63,7
(Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(ОДФО)	322	47,2	13,00	-65,0	322	-52,3 279,2	7,89 8,9	-62,7 70,3
(Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(ОДФО)	301	52,6 41,7	6,95 21,92 0,19	-21,16 $T_{кр}$ -0,7C	325	37,4 42,7 $T_{кр}$ -14,4C	0,16 24,6 $T_{кр}$ 24,31	-23,8
(Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(СОД)	304	48,0 40,9	7,33 1,54	-35,5	332	—	—	-34,0
(Р-ТДИ-2500-ТДИ-Р)(МФДА)	355	52,6	4,59	-30,8	360	—	—	-29,4

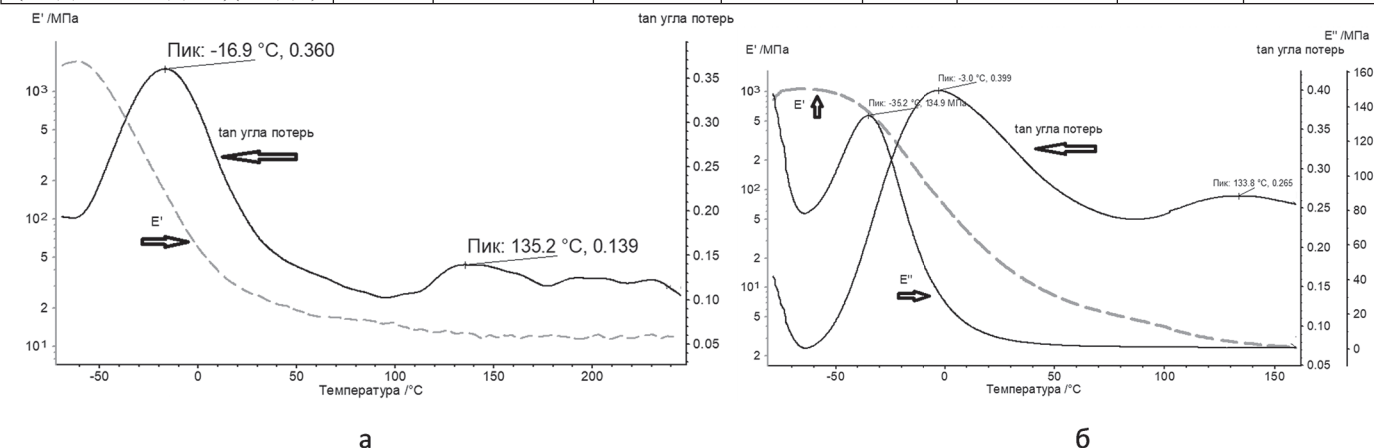


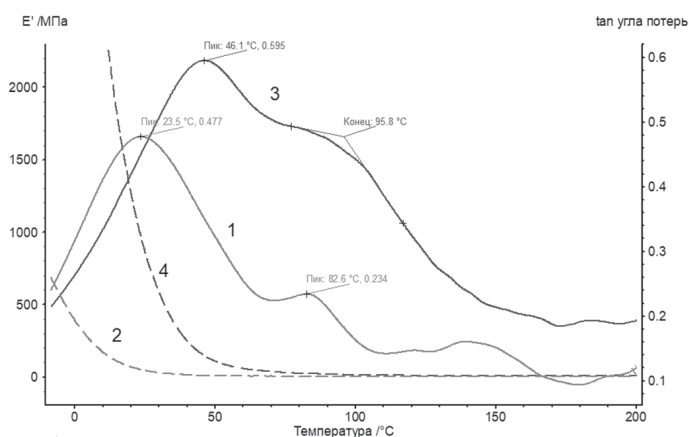
Рис. 4. Кривые ДМА сополи(уретан-имида) в форме пленки (а) и молдинга (б), для образцов сополи(уретан-имида) (Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(СОД).

При сопоставлении значений индексов термостойкости τ_5 (температуры, при которой потеря массы образца составляет 5%) видно, что величины индексов τ_5 заметно выше в случае молдингов. Разумно связать этот факт с высказанным выше предположением о превышении в случае молдингов относительного содержания ароматических блоков в сравнении с алифатическими за счет некоторой деструкции при переработке пресс-порошка в молдинг.

Из сравнительного анализа результатов, полученных при исследовании образцов пленок и молдингов методом ДСК (табл. 1), следует, что в случае молдингов проявляется тенденция к усилению совместимости алифатических и ароматических блоков (микрораз) в объеме полимеров. Примером тому служат данные рис. 3. На рис. 3 приводятся результаты исследований пленки и молдинга, полученных на основе сополи(уретан-имида) (Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(ОДФО).

На кривой второго сканирования (рис. 3б) проявляется эффект в области 70,3 °C, отвечающий, весьма вероятно, за плавление образовавшейся смешанной алифатико-ароматической фазы.

Сравнительное исследование динамических механических свойств образцов пленок и молдингов указывает на некоторое ослабление эластических свойств полимерных систем в случае молдингов по сравнению с пленками (например, рис. 4, 5).

Рис. 5. Температурные зависимости для образцов сополи(уретан-имида) (Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(СОД) в форме пленки: $\tan \delta$ кривая 1) и E' (кривая 2) и в форме молдинга: $\tan \delta$ (кривая 3) и E' (кривая 4).

На представленных на рис. 4, 5 кривых в случае молдингов наблюдается повышение температур переходов стеклования алифатической и смешанной фаз в плюсовую область и увеличение тангенса угла механических потерь. Полимерная система является более жесткой.

Образцы молдингов демонстрируют типичные для эластомеров деформационно-прочностные свойства (табл. 2) с высокими значениями удлинения при разрыве (сотни %) и сравнительно невысокими значениями модуля упругости (несколько МПа). Однако следует отметить, что несколько более высокие значения модуля упругости, прочности при разрыве и удлинения при разрыве (табл. 2) имеют образцы пленок, которые сформированы непосредственно из растворов сополи(уретан-имидов), полученных в результате поликонденсационного процесса. При сопоставлении деформационно-прочностных свойств молдингов и пленок следует иметь в виду, что, наряду с многими другими факторами, в пленках при формировании имеет место плоскостная ориентация полимерных цепей, тогда как в случае молдингов (пластиков) такая ориентация отсутствует.

Таблица 2. Механические характеристики полученных из поли(уретан-имидов) пленок и молдингов.

Сополи(уретан-имид)	$E, \text{МПа}$	$s_p, \text{МПа}$	$e_p, \%$
(Р-ТДИ-2500-ТДИ-Р)(МФДА)			
Пленка	$6,2 \pm 0,4$	$42,9 \pm 4,9$	1431 ± 82
Молдинг	$5,1 \pm 0,3$	$10,8 \pm 1,5$	918 ± 59
(Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(ОДФО)			
Пленка	$145,1 \pm 18,1$	$25,42 \pm 0,8$	341 ± 31
Молдинг	$131,1 \pm 21,6$	$7,55 \pm 0,2$	229 ± 25
(Р-ТДИ-2000-ТДИ-Р)(СОД)			
Пленка	$35,1 \pm 5,8$	$28,15 \pm 0,8$	1020 ± 20
Молдинг	$29,5 \pm 7,8$	$15,43 \pm 0,2$	$681 \pm 0,7$
(Р-ТДИ-2300-ТДИ-Р)(СОД)			
Пленка	$20,9 \pm 0,9$	$9,63 \pm 0,37$	524 ± 25
Молдинг	$20,9 \pm 0,9$	$9,63 \pm 0,37$	235 ± 13

Подводя итоги, можно сказать, что исследованные в работе сополи(уретан-имиды) относятся к числу технологичных термоэластопластов. Из проведенного исследования следует, что процессы микродеструкции, имеющие место при переработке сополи(уретан-имидов) в условиях температурных и сдвиговых нагрузок, последствия которых выявляются в экспериментах с пленками и молдингами с использованием методов ИК-спектроскопии, ТГА, ДСК и ДМА, необходимо учитывать. Однако упомянутые процессы не являются критическими для проявления исследованными сополи(уретан-имидами) свойств термоэластопластов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2020-794). (We acknowledge funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2020-794))

Литература

1. M.I. Bessonov, M.M. Koton, V.V. Kudryavtsev, and L.A. Laius. Polyimides Thermally Stable Polymers. Consultants Bureau, N.Y., 1987, P. 318.
2. K.L. Mittal, Ed., Polyimides: Synthesis, Characterization, and Applications, Vol. 1, Plenum Press, New York, 1984.
3. Коршак В.В. Термостойкие полимеры, 1969, М.: Наука, С. 411.
4. P.M. Hergenrother. The Use, Design, Synthesis, and Properties of High Performance/ High Temperature Polymers: an Overview. High Performance Polymers, V.15, P. 3–45, (2003).
5. X. Sang, R. Wang, X. Chen, L. Zhang, M. An, Y. Shen, Advanced Materials Research, 2011, 284–286, 1746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.284-286.1746>.
6. T. Ueda, S.-I. Inoue, Organic Polymer Materials, 2018, V.8, 11. <https://doi.org/10.4236/ojopm.2018.81001>.
7. A. Jonquieres, R. Clement, P. Lochon, Prog. Polym. Sci, 2002, V. 27, 1803. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00024-2).
8. X. Solimando, J. Babin, C. Arnal-Herault, M. Wang, D. Barth, D. Roizard, J.-R. Doillon-Halmenschlager, M. Poncot, I. Royaud, P. Alcouffe, L. David, A. Jonquiere, Polymer, 2017, V. 131, 56. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.10.007>
9. J.-Y. Jeon, & T.-M. Tak, Journal of Applied Polymer Science, 1996, 62(5), 763–769. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19961031\)62:5<763::aid-app7>3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19961031)62:5<763::aid-app7>3.0.co;2-u).
10. M. Zuo, & T. Takeichi, Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1997, 35(17), 3745–3753. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-0518\(199712\)35:17<3745::aid-pola14>3.0.co;2-d](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-0518(199712)35:17<3745::aid-pola14>3.0.co;2-d).
11. R.M. Gerkin, & B.L. Hilker (2001). Block Copolymers: Segmented. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001, 730–732. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/00140-6>.
12. D.K. Chattopadhyay, K.V.S.N. Raju Structural Engineering of Polyurethane Coatings for High Performance Applications. Prog. Polym. Sci. 2007, 32, P. 352.
13. A.L. Didenko, V.E. Yudin, V.E. Smirnova, I.V. Gofman, E.N. Popova, V.Yu. Elovskovskii, V.M. Svetlichnyi, V.I. Kudryavtsev, Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods, and Technologies, 2014, V. 8, <http://www.scientific-publications.net>, [https://www.scientific-publications.net/ru/article/1000143/\(https://www.scientific-publications.net/get/1000002/1401698332577960.pdf\)](https://www.scientific-publications.net/ru/article/1000143/(https://www.scientific-publications.net/get/1000002/1401698332577960.pdf)).
14. A. Didenko, V. Smirnova, G. Vaganov, E. Popova, V. Elovskovskii, O. Toloshko, E. Vasilyeva, D. Kuznetsov, V. Svetlichnyi, V. Yudin, V. Kudryavtsev Materials, Methods and Technologies, 2018, 12, 144–158. <https://www.scientific-publications.net/get/1000030/1536243749619408.pdf> Materials, Methods & Technologies, 2018, V. 12. <https://www.scientific-publications.net/ru/article/1001690/>.
15. Зонненшайн М.Ф. Полиуретаны. Состав, свойства, производство, применение, пер. с англ. яз. СПб.: Профессия, 2018. С. 576.
16. A. Didenko, D. Kuznetsov, V. Smirnova, G. Vaganov, A. Ivanov, V. Yudin, V. Kudryavtsev, Nano Hybrids and Composites, 2022, V. 34, P. 23–28. <https://doi.org/10.4028/p-rcjpez>.
17. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, V.E. Smirnova, E.A. Bogdanov, G.V. Vaganov, A.G. Ivanov, I.A. Kobychko, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev. Russian Journal Of Applied Chemistry, 2021, V.94, #9, P. 1240–1259. <https://doi.org/10.1134/S107042722109007X>.
18. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, V.E. Smirnova, G.V. Vaganov, A.G. Ivanov, E.N. Popova, V.Y. Elovskovskii, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev, Russian Journal Of Applied Chemistry, 2020, V.93, #1, P. 45–56. <https://doi.org/10.1134/S107042722001005X>.
19. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, V.E. Smirnova, E.N. Popova, G.V. Vaganov, A.G. Ivanov, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev, Russian Chemical Bulletin, 2020, 69(2), 369–377. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2769-8>.
20. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, G.V. Vaganov, V.E. Smirnova, E.N. Popova, A.G. Ivanov, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev, Polymer Science, Series C, 2020, 62(2), 90–110. <https://doi.org/10.1134/s1811238220020046>.
21. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, G.V. Vaganov, V.E. Smirnova, E.N. Popova, A.G. Ivanov, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev, Key Engineering Materials, 2020, 869, 280–295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.869.280>.
22. A.L. Didenko, D.A. Kuznetsov, G.V. Vaganov, V.E. Smirnova, E.N. Popova, V.M. Svetlichnyi, V.E. Yudin, V.V. Kudryavtsev, O.V. Tolochko, E.S. Vasilyeva, Russian Chemical Bulletin, 2019, V. 68, #8, 1603–1612. <https://doi.org/10.1007/s11172-019-2599-8>.
23. Холден Г., Крихеддорф Х.Р., Куирк Р.П. Термоэластопласты, СПб.: Профессия, 2011, Перевод с англ. 3-го изд. (Thermoplastic Elastomers) под ред. Смирнова Л.Б. С. 720.