

*М. Б. Аликин, К. Д. Алексеева, Д. А. Панфилов, И. М. Дворко, Н. А. Лавров\**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Россия*

## **СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ОТВЕРЖДЕННЫХ ПРОДУКТАМИ АМИНОЛИЗА ВТОРИЧНЫХ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА И ПОЛИКАРБОНАТА**

*M. B. Alikin, K. D. Alekseeva, D. A. Panfilov, I. M. Dvorko, N. A. Lavrov\**

### **THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITIONS CURED BY AMINOLYTIC SPLITTING PRODUCTS OF A SECONDARY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE AND POLYCARBONATE**

**Keywords:** curing, modification, epoxy, structural composites, rheology

Epoxy compositions cured by products of the reaction of aminolysis splitting from secondary polyethylene terephthalate and polycarbonate (household waste) with polyethylene polyamine (PEPA) were studied. The oligomers developed were used as crosslinking agents of an ED-20 epoxyDiane resin for studying its physicochemical properties. The change in viscosity during the curing of thermosetting resin was analyzed, and some its kinetic parameters were found. The thermophysical and mechanical properties of the cured materials were determined, and the optimal content of the hardener in the composition was established. The population of data pointed to the expediency of using PET and PC household waste to produce oligomers by the aminolysis splitting reaction. The use of them as hardeners can increase the physical and mechanical properties of structural materials. The materials developed have demonstrated improvements in the elasticity parameters, the ultimate strength in static bending and compression, the Brinell hardness, and the shear stress.

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [Lna@lti-gti.ru](mailto:Lna@lti-gti.ru)  
Corresponding author: [Lna@lti-gti.ru](mailto:Lna@lti-gti.ru)

**Ключевые слова:** отверждение, модификация, эпоксид, композит конструкционный, реология

Исследовали эпоксидные композиции, отвержденные олигомерами, полученными реакцией аминолита из вторичных полиэтилентерефталата (ПЭТ) и поликарбоната (ПК) (бытовые отходы) с полиэтиленполиамином (ПЭПА). Для изучения физико-химических свойств разработанные олигомеры использовали в качестве сшивающих агентов эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20. Проведен анализ изменения вязкости в процессе отверждения терморезактивной смолы, определены некоторые кинетические параметры, теплофизические и механические свойства отвержденных материалов, оптимальное содержание отвердителя в композиции. Совокупность данных указывает на целесообразность использования бытовых отходов ПЭТ и ПК для получения олигомеров реакцией аминолита, их применение в качестве отвердителей позволяет повысить физико-механические свойства конструкционных материалов. Разработанные материалы демонстрируют улучшение свойств по следующим параметрам: упругости, пределу прочности при статическом изгибе и сжатии, твердости по Бринеллю и сдвиговому напряжению.

## Введение

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) и поликарбонат (ПК) — полимеры, с каждым годом набирающие популярность в областях непосредственного применения, что влечет за собой увеличение объемов их производства, а значит, и количество отходов.

Состояние с переработкой или утилизацией полимеров в мире неоднозначно. Так, в некоторых странах ЕС (Австрии, Германии, Голландии, Швеции) и Швейцарии до 40% полимерных отходов перерабатываются в качестве вторичного сырья, а 60% используются как дополнительные источники энергии [1]. Однако не все страны располагают необходимыми современными технологиями переработки и утилизации вторичного сырья. В нашей стране задачи высокоэффективной переработки отходов как вторичного сырья решены в недостаточной степени. И если в отношении вторичного ПЭТ достаточно давно известны различные способы переработки и возвращения в цикл производства, то в случае ПК таких методов либо нет, либо они находятся в статусе “перспективных”, не имеющих широкого применения [2—4].

Особенности строения и простота химической переработки этих полимеров позволяют получать ценные продукты [5, 6], которым можно найти применение во многих областях промышленности, строительства и т.д. [7—9]. В настоящей работе изучали реакцию аминолита ПЭТ и ПК с промышленным алифатическим амином — полиэтиленполиамином

(ПЭПА) с целью получения олигомеров. Подтверждено, что встраивание фрагментов ПЭТ и ПК в структуру полимера приводит к увеличению меж-узлового пространства макромолекул и росту их гибкости, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках отвержденных эпоксидных смол. Использовали эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20 ввиду ее доступности, хороших свойств, приемлемой вязкости и широкой применимости [10].

Для достижения цели и решения задач исследования был осуществлен процесс переэтерификации бытовых отходов ПЭТ и ПК с алифатическим амином (продукты реакции могут быть применены как отвердители эпоксидных смол [11]), изучены физико-механические и технологические свойства материалов, проведено сравнение свойств модифицированных материалов с материалами на основе промышленного отвердителя, подобраны оптимальные соотношения смола—отвердитель.

Применение продуктов аминолита вторичных ПЭТ и ПК в качестве отвердителей эпоксидных смол может стать интересным направлением их переработки, позволяющим не только обратить внимание на не использование этих полезных ресурсов при их захоронении на полигонах твёрдых бытовых отходов, но и улучшить физико-механические и технологические свойства получаемых конструкционных материалов.

### Экспериментальная часть

**Материалы и реактивы.** Основа композиций — эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 (Chimex Ltd, Россия), представляющая собой жидкий реакционноспособный олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана. Это вязкая прозрачная жидкость без видимых механических включений: молекулярная масса 390–430, эпоксидный эквивалент 196–216 г/экв, динамическая вязкость 13–20 Па·с, плотность при комнатной температуре 1166 кг/м<sup>3</sup>. В качестве промышленного отвердителя использовали ПЭПА (далее ПА, Chimex Ltd, Россия) — жидкость от светло-желтого до темно-бурого цвета без механических включений: молекулярная масса 230–250, аминное число 1250 (мг КОН)/(г вещества), динамическая вязкость 0,25 Па·с, плотность при комнатной температуре 1017 кг/м<sup>3</sup>. Олигомер-отвердитель ПА-Т получен посредством реакции аминолита ПЭТ алифатическим амином, а ПА-ПК — аминолитом ПК. Эти продукты представляют собой вязкие жидкости от темно-коричневого до темно-зеленого цвета с резким аминным запахом, содержат реакционноспособные аминогруппы, способные реагировать с эпоксидными группами смолы с образованием пространственно сшитого полимера плотностью 1150–1180 кг/м<sup>3</sup>.

**Методики испытаний.** *Содержание отвердителей в композициях* от минимального к максимально допустимому выбирали исходя из стехиометрического соотношения смолы и отвердителя, определяемого

эпоксидным эквивалентом смолы и аминным эквивалентом отвердителя [10]. Расчеты производили по следующим формулам:

— для эквивалентной массы  $EW_e$ , г/экв (equivalent weight) эпоксидной смолы —

$$EW_e = \frac{43 \cdot 100}{M_{eg}}, \quad (1)$$

где 43 — молекулярная масса эпокси-группы;  $M_{eg}$  — массовая доля эпоксидных групп, %;

— для эквивалентной массы амина  $EW_a$ , г/экв, —

$$EW_a = \frac{MM}{H}, \quad (2)$$

где MM — молекулярная масса амина;  $H$  — количество активных атомов водорода;

— для необходимого количества отвердителя  $K_{amin}$  —

$$K_{amin} = \frac{EW_a \cdot 100}{EW_e}, \quad (3)$$

где  $K_{amin}$  — количество амина на 100 мас.ч. эпоксидной смолы, мас.ч.

Для расчета эквивалентной массы отвердителя  $EW_h$  воспользуемся формулой для определения  $EW_{mixt}$  смеси его составляющих:

$$EW_h = \frac{M}{\left( \frac{M_A}{EW_A} + \frac{M_B}{EW_B} + \frac{M_C}{EW_C} + \frac{M_D}{EW_D} + \frac{M_E}{EW_E} \right)} \quad (4)$$

где  $M$  — общая масса отвердителей, г;  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$ ,  $M_D$ ,  $M_E$  — доли А, В, С, D и Е в отвердителе соответственно, мас.ч.

По формуле (4), путем поочередного приравнивания всех компонентов, кроме одного, нулю, был рассчитан диапазон содержания отвердителя в композиции: для ПА — от 10 до 16 мас.ч., для ПА-Т — от 12 до 15 мас.ч., для ПА-ПК — от 13 до 16 мас.ч.

*Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье.* Было установлено строение синтезируемых олигомеров методом ИК Фурье-спектроскопии на ИК Фурье-спектрометре Shimadzu IRTAcser-100 в спектральном диапазоне 4000—500  $\text{см}^{-1}$  при комнатной температуре в соответствии с ASTM E1252-98 (2013)e1 и ASTM E334-01 (2013).

*Динамическую вязкость* измеряли в соответствии с ISO 6721-10:2015 на реометре Anton Paar PHYSICA MCR 302 с измерительной ячейкой типа плоскость—плоскость при постоянной скорости сдвига 1  $\text{с}^{-1}$  при 50 и 75 °С. Полученные данные использовали для расчета энергии активации отверждения ( $E_a$ , кДж/моль), определяемой по тангенсу угла наклона

линеаризованных зависимостей  $\ln(\tau_{\text{gel}}) — f(1/T)$ . Для таких зависимостей можно представить функции вида  $y = kx + b$ , их описывающие, где  $k$  — угловой коэффициент прямой, численно равный тангенсу угла между осью абсцисс и этой прямой (в данном случае величиной  $E_a/R$ ). Тогда при умножении коэффициента  $k$  в каждой из зависимостей на универсальную газовую постоянную  $R$  можно закономерно определить энергию активации.

*Определение аминного числа AV (amine value)* основано на титровании спиртового раствора отвердителя водным раствором соляной кислоты. Навеску амина массой  $(0,6000 \pm 0,05)$  г помещают в коническую колбу и растворяют в  $20 \text{ см}^3$  изопропилового спирта. Добавляют пять—шесть капель индикатора бромкрезолового зеленого и титруют до перехода окраски в желтый цвет.

AV (мг·KOH/г) определяют по формуле

$$AV = \frac{V \cdot K \cdot 28,05}{m}, \quad (5)$$

где  $V$  — объем соляной кислоты концентрации  $0,5 \text{ моль/дм}^3$ , израсходованной на титрование;  $28,05$  — количество KOH, соответствующее  $1 \text{ см}^3$  соляной кислоты концентрации точно  $0,5 \text{ моль/дм}^3$ ;  $K$  — поправочный коэффициент к раствору соляной кислоты концентрации  $0,5 \text{ моль/дм}^3$ ;  $m$  — масса отвердителя, г.

*Экстрактивный гравиметрический анализ.* Гель-золь анализ осуществляли посредством экстракции ацетоном неотвержденных продуктов в аппарате Сокслета в температурном диапазоне  $65—75 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 8 ч; определено содержание гель-фракции ( $G$ , %).

*Механические испытания.* Твердость ( $H_B$ , МПа), упругость ( $E$ , %) и пластичность ( $P$ , %) материалов определяли методом Бринелля в соответствии с ISO 2039–1:2001 на твердомере Бринелля при одинаковой нагрузке 50 кгс. Деформационно-прочностные свойства полимерных материалов при статическом изгибе  $\sigma_b$ , МПа, растягивающем усилии  $\tau_{sh}$ , МПа, и сжатии  $\sigma_c$ , МПа, определяли на универсальной испытательной машине Shimadzu AG-X Plus при скорости нагружения  $10 \text{ мм/мин}$  по ISO 178:2019, ASTM D5868-01(2014) и ISO 604:2002 соответственно.

*Термомеханический анализ (ТМА)* осуществляли на модифицированном консистометре Хепплера при нагрузке  $111,8 \text{ Н}$  и скорости нагревания  $2 \text{ град/мин}$  в соответствии с ISO 604:2002 (Part 2). По термомеханическим свойствам полимеров и их температуре стеклования ( $T_g$ ,  $^\circ\text{C}$ ) определены молекулярная масса кинетического сегмента цепи ( $M_n$ , кг/кмоль) и плотность структурной сетки ( $N_n$ , кмоль/ $\text{м}^3$ ), рассчитан модуль высокоэластичности (rubber elasticity) ( $E_r$ , МПа) [12]:

$$M_n = \gamma \frac{3\rho RT}{E_r}, \quad (6)$$

$$E_{\Gamma} = \frac{F \varepsilon_0}{S \Delta \varepsilon}, \quad (7)$$

$$N_n = \frac{\rho}{M_n}, \quad (8)$$

где  $S$  — площадь сечения образца,  $\text{см}^2$ ;  $\varepsilon_0$  — начальная высота образца, мм;  $\rho$  — плотность образца,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $F$  — нагрузка на образец, кгс;  $\Delta \varepsilon$  — высокоэластическая деформация, мм;  $T$  — начальная температура высокоэластического состояния, К;  $R$  — газовая постоянная, равная  $84,8 \text{ (кгс}\cdot\text{см)} / (\text{моль}\cdot\text{К)}$ ;  $\gamma = 1$ .

### Результаты и обсуждение

Предполагали, что при совмещении ПЭПА с ПЭТ и ПК идет реакция аминолита, в результате которой происходит встраивание фрагментов деструктурированных полимеров в цепи полиаминного отвердителя. Характеристические пики, отвечающие за колебания групп в полученных соединениях охарактеризованы методом ИК-спектроскопии.

На рис. 1 представлены зависимости интенсивности пропущенного через образцы инфракрасного излучения  $I$  от частоты  $\nu$ . Из данных рис. 1—*a* можно сделать вывод о том, что реакции аминолита протекают по сложноэфирной группе, а на спектре продукта реакции (ПА-Т) наблюдаются характеристические пики карбонильной группы, связанной с первичным амином ( $1646 \text{ см}^{-1}$ ), и амидной группы ( $1554 \text{ см}^{-1}$ ). Сохранились пики первичной аминогруппы ( $3363\text{—}3280 \text{ см}^{-1}$ ), что объясняет реакционную способность полученного олигомера по отношению к эпоксидным группам.

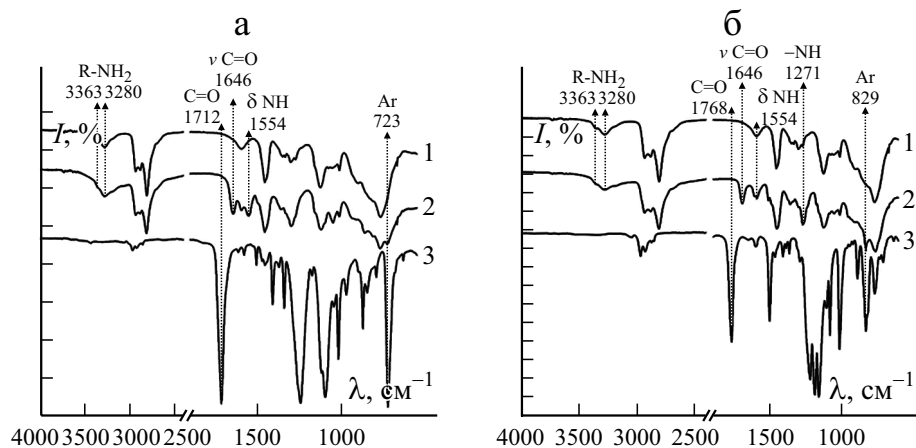


Рис. 1. ИК-спектры для ПА (1); ПА-Т (2); ПЭТ (3) (а) и ПА (1), ПА-ПК (2); ПК (3) (б).

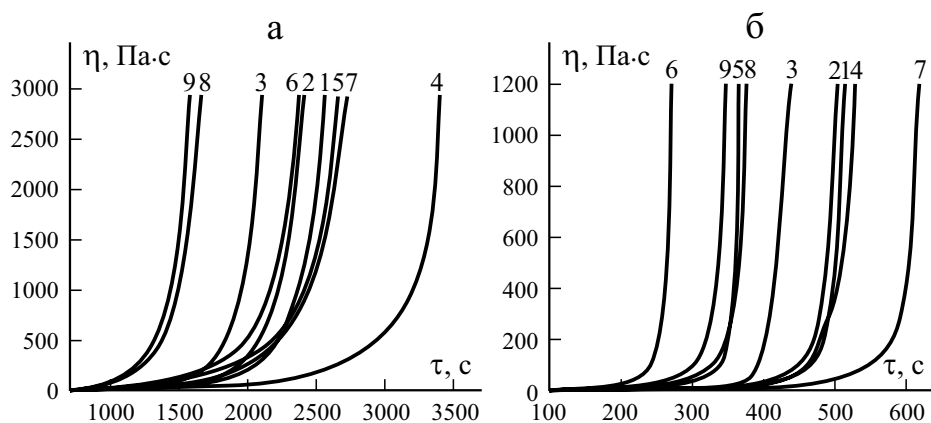


Рис. 2. Зависимость вязкости  $\eta$  от времени отверждения  $\tau$  при 50 (а) и 75 °С (б) для композиций с содержанием отвердителя (мас.ч.) ПА 10 (1); ПА 12 (2); ПА 16 (3); ПА-Т 10 (4); ПА-Т 14 (5); ПА-Т 16 (6); ПА-ПК 10 (7); ПА-ПК 15 (8); ПА-ПК 16 (9).

Как видно из данных рис. 1—б, полоса испускания при  $1768\text{ см}^{-1}$  в спектре ПК, соответствующая валентным колебаниям группы  $\text{C}=\text{O}$  в  $\text{Ar}-\text{O}-\text{C}(\text{O})-\text{O}-\text{Ar}$  карбонатах, полностью отсутствует в спектре ПА-ПК, что указывает на разрушение сложноэфирных связей в ПК. Также можно заметить полосу испускания при  $1271\text{ см}^{-1}$  в спектре ПА-ПК, соответствующую колебаниям в первичном ароматическом амине, и полосу амидной группы ( $1554\text{ см}^{-1}$ ). Появление амидной группы указывает на протекание реакции переэтерификации, представляющей собой аминолитическое расщепление цепей вторичного ПЭТ и ПК в результате нуклеофильной атаки преимущественно первичных аминогрупп на сложноэфирную связь, что приводит к образованию олигомеров и низкомолекулярных соединений.

Важной характеристикой амидных соединений является их аминное число  $\text{AV}$ . Увеличение доли вторичных ПЭТ и ПК по отношению к ПЭПА ведёт к постепенному убыванию  $\text{AV}$  с 1220 до 980 мг  $\text{KOH}/\text{г}$  для ПА-Т и с 1220 до 870 мг  $\text{KOH}/\text{г}$  для ПА-ПК. Причиной этого является процесс переэтерификации.

Энергию активации определяли, измеряя динамическую вязкость при помощи реометра. Измерения проводили для композиции с минимальным (10 мас.ч. отвердителя на 100 мас.ч. смолы), оптимальным (12 мас.ч. для ПА, 14 мас.ч. для ПА-Т и 15 мас.ч. для ПА-ПК) и максимальным (16 мас.ч. отвердителя) соотношением при 50 и 75 °С. По результатам измерений для каждой композиции были построены зависимости вязкости  $\eta$  от времени гелеобразования  $\tau$  (рис. 2),  $\ln(\tau_{\text{gel}}) - f(1/T)$  (рис. 3) и обратной вязкости от времени гелеобразования (рис. 4).

Изучение динамической вязкости композиций при 50 и 75 °С позволило построить зависимости, демонстрирующие, в какой момент времени

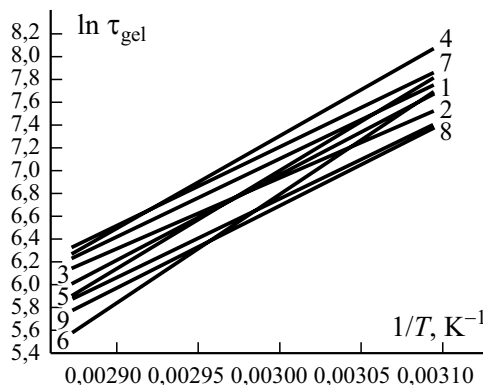


Рис. 3. Линеаризованная зависимость  $\ln(\tau_{gel})$  от величины  $1/T$  эпоксидных композиций с содержанием отвердителя (мас.ч.) ПА 10 (1); ПА 12 (2); ПА 16 (3); ПА-Т 10 (4); ПА-Т 14 (5); ПА-Т 16 (6); ПА-ПК 10 (7); ПА-ПК 15 (8); ПА-ПК 16 (9).

достигается максимальная вязкость, т.е. наступает момент гелеобразования той или иной композиции.

Данные об энергии активации отверждения и предела прочности для всех образцов приведены в табл. 1.

Полученные усредненные термомеханические кривые (ТМК) для оптимальных точек содержания отвердителей в композиции представлены на рис. 5.

Стоит упомянуть, что ТМК изучаемых образцов не совсем соответствуют ТМК, присущим типичным сетчатым полимерам; полученные кривые имеют четко выраженное “плато” высокоэластического состояния,

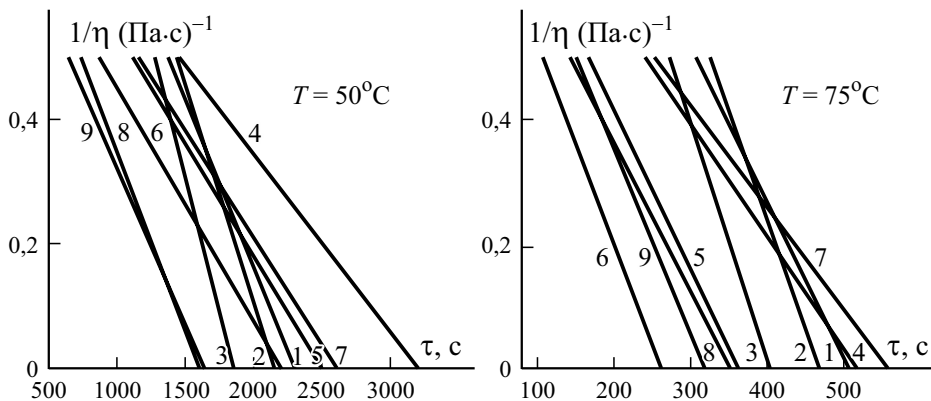


Рис. 4. Зависимость обратной вязкости  $1/\eta$  от времени гелеобразования  $\tau$  для эпоксидных композиций с содержанием отвердителя (мас.ч.) ПА 10 (1); ПА 12 (2); ПА 16 (3); ПА-Т 10 (4); ПА-Т 14 (5); ПА-Т 16 (6); ПА-ПК 10 (7); ПА-ПК 15 (8) и ПА-ПК 16 (9).



Табл. 1

## Физико-механические и эксплуатационные свойства полученных материалов на основе ПА, ПА-Т и ПА-ПК

Отвердитель	Содержание, мас.ч.	$H_B$ , МПа	$E$ , %	$\sigma_b$	$\tau_{sh}$	$\sigma_{com}$
				МПа		
ПА	10	135±6,8	86,7±0,7	54,7±2,4	3,7±0,4	106±5,3
	<b>12</b>	<b>138±5,8</b>	<b>80,8±0,4</b>	<b>70,7±2,2</b>	<b>4,7±0,3</b>	<b>113±4,7</b>
	14	143±7,9	83,7±0,8	68,3±1,2	3,6±0,3	109±6,0
	16	125±8,4	87,2±0,5	65,2±2,1	2,8±0,1	107±7,2
ПА-Т	12	145±4,6	94,9±0,2	76,4±0,6	3,3±0,2	92±2,9
	13	137±6,0	93,7±0,4	75,1±1,2	4,7±0,4	94±4,1
	<b>14</b>	<b>138±5,4</b>	<b>96,2±0,4</b>	<b>73,8±1,7</b>	<b>5,1±0,3</b>	<b>97±3,8</b>
ПА-ПК	15	134±9,4	96,0±0,3	69,8±0,9	3,4±0,2	93±6,5
	13	166±9,1	95,2±0,5	70,4±1,5	3,1±0,2	90±5,0
	14	174±7,7	93,7±0,8	72,7±1,2	4,3±0,4	95±4,2
	<b>15</b>	<b>159±5,7</b>	<b>88,5±0,4</b>	<b>76,8±2,4</b>	<b>5,0±0,5</b>	<b>104±3,7</b>
	16	144±4,2	96,6±0,4	62,9±0,7	3,3±0,5	102±3,0

которое характерно для аморфных термопластов, а не для реактопластов. Данный факт объясняется тем, что получаемый полимер обладает редкосшитой структурой, что позволяет частично сохранить подвижность межузловых сегментов цепи.

При помощи полученных данных и построенных ТМК можно рассчитать молекулярную массу подвижного сегмента цепи, модуль высокоэластичности и плотность сшивки по формулам (5)—(7).

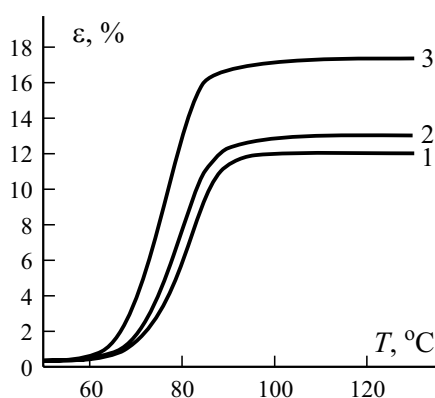


Рис. 5. Зависимость деформации образца  $\varepsilon$  от температуры  $T$ . ТМК оптимальных точек эпоксикомпозиций с содержанием ПА 12 (1); ПА-Т 14 (2); ПА-ПК 15 мас.ч. (3).

Табл. 2

Теплофизические и физико-химические свойства полученных материалов на основе ПА, ПА-Т и ПА-ПК

Отвердитель	Содержание, мас. ч.	$E_a$ , кДж/моль	$T_g$ , °С	$G$ , %	$N_c \cdot 10^3$ , кмоль/м <sup>3</sup>	$M_n$ , кг/кмоль
ПА	10	51,4±0,1	74-79	82,9±0,2	1,27±0,16	940±83
	<b>12</b>	<b>55,9±0,1</b>	<b>76-82</b>	<b>93,9±0,2</b>	<b>1,26±0,09</b>	<b>950±48</b>
	14	59,1±0,1	84-90	93,0±0,2	1,40±0,11	856±43
	16	62,0±0,1	92-96	89,9±0,2	1,61±0,26	744±80
ПА-Т	12	67,8±0,2	74-78	88,2±0,2	0,98±0,06	1229±53
	13	70,2±0,1	80-83	87,1±0,2	1,22±0,11	1010±64
	<b>14</b>	<b>71,9±0,2</b>	<b>82-84</b>	<b>86,9±0,2</b>	<b>1,14±0,05</b>	<b>1059±32</b>
	15	78,6±0,1	85-87	88,7±0,2	1,22±0,09	989±51
ПА-ПК	13	56,8±0,2	67-72	88,7±0,2	0,76±0,03	1590±44
	14	57,2±0,3	74-78	89,1±0,2	0,78±0,08	1553±112
	<b>15</b>	<b>59,1±0,2</b>	<b>79-81</b>	<b>88,9±0,2</b>	<b>0,85±0,15</b>	<b>1425±62</b>
	16	60,3±0,1	82-84	89,0±0,2	0,97±0,23	1248±95

Данные о температурах стеклования и результаты расчётов для всех исследуемых образцов приведены в табл. 2.

Введение в состав композиции фрагментов деструктурированных ПЭТ и ПК в целом положительно отразилось на значениях максимальных изгибающих и сдвиговых напряжений, а также закономерно снизило предел прочности при сжатии, что объясняется ростом гибкости макромолекул полимера при использовании ПА-Т и ПА-ПК, из которой следует увеличение упругости материала.

### Вывод

Синтезированы новые отвердители — олигомеры на основе продуктов деструкции вторичных ПЭТ и ПК, изучены их химические и физические свойства, а также материалов на их основе, и оптимизировано содержание ПА, ПА-Т и ПА-ПК в составе эпоксидных композиций.

Полученные данные о молекулярной массе кинетического сегмента цепи, плотности шивки, температуре стеклования отвержденных образцов и результаты ИК-спектроскопии доказывают встраивание фрагментов деструктурированных ПЭТ и ПК в структуру полимера.

Значения гель-фракции в композициях независимо от применяемого отвердителя согласуются с расчетными значениями энергии активации, из чего следует, что введение фрагментов деструктурированных ПЭТ и ПК

в структуру композиции не оказывает негативного влияния на качество процесса отверждения.

С учетом данных табл. 1, 2 можно сделать вывод о том, что оптимальное соотношение отвердитель—смола будут 12 мас.ч. ПА, 14 мас.ч. ПА-Т, 15 мас.ч. ПА-ПК на 100 мас.ч. эпоксидной смолы. Материалы с таким соотношением в случае ПА-Т и ПА-ПК по сравнению с ПА демонстрируют улучшение свойств по таким параметрам, как упругость, предел прочности при статическом изгибе, твердость по Бринеллю и сдвиговое напряжение.

Таким образом, можно утверждать, что использование вторичных ПЭТ и ПК в качестве модификаторов отвердителей целесообразно, поскольку является перспективным способом переработки бытовых отходов, характеризующимся простотой синтеза, а также дешевизной и доступностью исходных компонентов и позволяющим повысить физико-механические свойства конструкционных материалов на основе эпоксидных смол.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20–33–90147 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание 0785.00.X6019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jiun Y. L.* Effects of recycling cycle on used thermoplastic polymer and thermoplastic elastomer polymer // *J. Polym. Compos.* — 2016. — Vol. 24, No. 9. — P. 735–740.
2. *Westhues S.* Molecular catalyst systems as key enablers for tailored polyesters and polycarbonate recycling concepts // *J. Sci. Adv.* — 2018. — Vol. 4, No. 8. — P. eaat9669.
3. *Kim J. G.* Chemical recycling of poly(bisphenol A carbonate) // *J. R. Soc. Chem.* — 2020. — No. 11. — P. 4830-4849.
4. *Bhogle C. S.* Ultrasound assisted methanolysis of polycarbonate at room temperature // *J. Ultrason. Sonochem.* — 2019. — No. 58. — P. 104667.
5. *Thiounn T.* Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // *J. Polym. Sustainability.* — 2020. — Vol. 58, No. 10. — P. 1347-1364
6. *Grigore M. E.* Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers // *J. MDPI Recycling.* — 2017. — Vol. 2, No. 24. — P. 1-11.
7. *Meawad A.* Novel bifunctional dispersing agents from waste PET packaging materials and interaction with cement // *J. Waste Management.* — 2019. — Vol. 85. — P. 563-573.
8. *Şimşek B.* Analysis of the effects of dioctyl terephthalate obtained from polyethylene terephthalate wastes on concrete mortar: A response surface methodology based desirability function approach application // *J. Cleaner Production.* — 2018. — Vol. 170. — P. 437-445.
9. *Palme A.* Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics // *Text Cloth Sustain.* — 2017. — Vol. 3, No. 4. — P. 1-9.
10. *Мошинский Л.* Эпоксидные смолы и отвердители. — Тель-Авив.: Аркадия пресс Лтд, 1995. — 370 с.

11. *Панфилов Д. А.* Применение отходов полиэтилентерефталата для получения пенофенопластов конструкционного назначения // Все материалы. Энциклопед. справочник с Приложением “Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам”. — 2016. — № 10. — С. 34–37.

12. *Крыжановский В. К.* Технические свойства полимерных материалов. — СПб.: Профессия, 2005. — 248 с.

Поступила в редакцию 13.10.2021

Окончательный вариант поступил 17.02.2022

Received Oct. 13, 2021 (Feb. 17, 2022)

---