

# ПОЛИМЕРНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## POLYMER MATERIALS SCIENCE

---

УДК 667.494.6:678.82

**Т. А. Вишнеvская, Н. Р. Прокопчук**  
Белорусский государственный технологический университет

### ПОВЕДЕНИЕ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИАМИДА-6 В ТЕПЛОВОМ ПОЛЕ

Исследовано комплексное влияние наноразмерных частиц диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) и оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ) в сверхмалых концентрациях (0,005–0,015 мас. %) на поведение полиамида-6 (ПА-6) в условиях теплового воздействия. Методом анализа кинетики нагрева и охлаждения установлено статистически значимое увеличение эффективной температуропроводности модифицированных композитов. Наибольший эффект наблюдался для образца с 0,015 мас. %  $\text{TiO}_2$ : его суммарный нагрев за 120 с превысил показатель чистого ПА-6 на 7,4%, а скорость охлаждения оказалась выше на 17,9%. Параллельно оценена устойчивость композитов к термоокислительному старению при 160°C. Установлено, что введение наночастиц снижает пиковые значения коэффициентов старения, рассчитанных по механическим характеристикам, и способствует сохранению более высоких абсолютных значений прочности после длительного теплового воздействия. Наибольший стабилизирующий эффект продемонстрировали частицы  $\text{TiO}_2$  в дозировке 0,015 мас. %. Полученные результаты можно объяснить синергией нескольких факторов: формированием межфазных взаимодействий (силы Ван-дер-Ваальса, водородные связи) на границе полимер – наночастица, приводящих к увеличению степени кристалличности и созданию перколяционных сеток для фононного переноса, а также созданием диффузионного барьера для кислорода и ограничением подвижности макромолекул в аморфных областях. Показано, что наномодифицирование ПА-6 сверхмалыми добавками  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$  является эффективным способом целенаправленного улучшения его теплофизических свойств и эксплуатационной стабильности при воздействии повышенных температур.

**Ключевые слова:** полиамид-6, диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ), оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), термоокислительная деструкция, температуропроводность, тепловое старение.

**Для цитирования:** Вишнеvская Т. А., Прокопчук Н. Р. Поведение наномодифицированного полиамида-6 в тепловом поле // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 54–63.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-5.

**T. A. Vishnevskaya, N. R. Prokopchuk**  
Belarusian State Technological University

### BEHAVIOR OF NANOMODIFIED POLYAMIDE-6 IN A THERMAL FIELD

A comprehensive study has been conducted on the influence of nanoscale titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) and zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) particles in ultralow concentrations (0.005–0.015 wt. %) on the behavior of polyamide-6 (PA-6) under thermal exposure. Analysis of the heating and cooling kinetics revealed a statistically significant increase in the effective thermal diffusivity of the modified composites. The most pronounced effect was observed for the sample containing 0.015 wt. %  $\text{TiO}_2$ : its total temperature increases over 120 s exceeded that of neat PA-6 by 7.4%, while its cooling rate was 17.9% higher. In parallel, the resistance of the composites to thermo-oxidative aging at 160°C was evaluated. It was established that the incorporation of nanoparticles reduces the peak values of aging coefficients calculated from mechanical characteristics and

promotes the retention of higher absolute strength values after prolonged thermal exposure. The most significant stabilizing effect was demonstrated by  $\text{TiO}_2$  particles at a concentration of 0.015 wt. %. The obtained results can be explained by the synergy of several factors: the formation of interfacial interactions (van der Waals forces, hydrogen bonds) at the polymer – nanoparticle boundary, leading to an increase in the degree of crystallinity and the creation of percolation networks for phonon transport, as well as the formation of a diffusion barrier for oxygen and the restriction of macromolecular mobility in the amorphous regions. It is demonstrated that nanomodification of PA-6 with ultralow additions of  $\text{TiO}_2$  and ZnO is an effective method for the targeted improvement of its thermophysical properties and operational stability under elevated temperatures.

**Keywords:** polyamide-6, titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), zinc oxide (ZnO), thermo-oxidative degradation, thermal diffusivity, thermal aging.

**For citation:** Vishnevskaya T. A., Prokopchuk N. R. Behavior of nanomodified polyamide-6 in a thermal field. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 54–63 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-5.

**Введение.** Полиамид-6 (ПА-6) является одним из наиболее востребованных инженерных термопластов благодаря удачному сочетанию механических свойств, износостойкости, химической устойчивости и технологичности. Его применяют в автомобилестроении, электротехнике, производстве упаковки и в текстильной промышленности [1]. Однако при использовании в условиях интенсивного или циклического теплового воздействия проявляются два ключевых ограничения материала: сравнительно низкая теплопроводность и склонность к термоокислительной деструкции.

Теплопроводность ( $\alpha$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ) является критически важным теплофизическим параметром для полимерных материалов, используемых в условиях теплового воздействия. Она определяет скорость выравнивания температуры в материале и находится как отношение теплопроводности ( $\lambda$ ) к удельной теплоемкости ( $C_p$ ) и плотности материала ( $\rho$ ) [2, 3]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}.$$

Для полимеров, включая ПА-6, характерны низкие значения  $\alpha$  (порядка  $10^{-7}$ – $10^{-8}$   $\text{м}^2/\text{с}$ ), что связано с аморфно-кристаллической структурой и фононным механизмом переноса тепла [3, 4]. Эффективность фононного переноса напрямую зависит от степени упорядоченности макромолекул, плотности межмолекулярных взаимодействий и наличия дефектов структуры, рассеивающих фононы. В аморфных областях рассеяние энергии значительно выше, чем в кристаллических, что снижает общую теплопроводность материала [4].

Термоокислительное старение – еще одна серьезная проблема для ПА-6, особенно при эксплуатации в кислородсодержащей среде при повышенных температурах. Процесс инициируется в аморфных фазах, где подвижность цепей и доступ кислорода максимальны, и протекает по цепному радикальному механизму, приводя к разрыву амидных связей, снижению молекулярной массы и ухудшению механических характеристик [5–16]. Традиционные способы стабилизации (антиоксиданты, ингибиторы радикальных процессов) не всегда эффективны и могут ухудшать другие свойства материала [14].

Для количественной оценки старения традиционно используют коэффициенты, отражающие изменение ключевых механических характеристик, таких как предел текучести при растяжении:

$$K_f = \frac{f_{\text{ст}}}{f_0}$$

и относительное удлинение:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{ст}}{\varepsilon_0},$$

где  $f_{ст}, f_0$  – предел текучести образца соответственно после и до старения;  $\varepsilon_{ст}, \varepsilon_0$  – удлинение образца соответственно после и до старения.

В мягких условиях старения (относительно не высокие температуры и время воздействия тепла и кислорода воздуха) старение может приводить к начальному образованию и последующей рекомбинации макрорадикалов с образованием сшитых структур, что временно повышает прочность ( $K_f > 1$ ). Однако дальнейшее воздействие ведет к деградации материала. Вследствие чего актуальной задачей является поиск эффективных способов подавления деструктивных процессов.

В этой связи наномодифицирование полимерных матриц представляется стратегически перспективным направлением для одновременного улучшения теплофизических характеристик и устойчивости к тепловому старению. Введение наноразмерных неорганических частиц (таких как диоксид титана ( $TiO_2$ ), оксид цинка ( $ZnO$ ), оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) и др.) даже в следовых количествах способно кардинально изменить структуру и поведение полимера благодаря их высокой удельной поверхности и энергии поверхностных взаимодействий [6, 11]. Для полярных полимеров, к которым относится ПА-6, взаимодействие между полярными группами макромолекул и поверхностью оксидных наночастиц (водородные связи, диполь-дипольные и ван-дер-ваальсовы взаимодействия) может индуцировать образование более упорядоченных надмолекулярных структур, служить центрами гетерогенной кристаллизации и создавать сеть для эффективного теплопереноса [5, 12]. Кроме того, наночастицы, распределенные в аморфной фазе, могут выступать физическим барьером, затрудняющим диффузию кислорода и подвижность макромолекул, тем самым замедляя процессы окислительной деструкции [7, 14].

Важно отметить, что концентрация модификатора является ключевым фактором. Сверхмалые добавки (менее 0,1 мас. %) часто оказываются более эффективными, чем более высокие дозировки, поскольку позволяют избежать агрегации частиц, обеспечивают их равномерное распределение и максимизируют площадь межфазной поверхности без существенного изменения технологических свойств матрицы [8].

В литературе представлены отдельные исследования влияния наночастиц  $TiO_2$  и  $ZnO$  на теплопроводность [4, 9] или термостабильность [6, 13] полиамидов, однако в данной работе используется комплексный подход к анализу их влияния на поведение материала в нестационарном тепловом поле (кинетика нагрева-охлаждения) и долговременную термоокислительную стабильность. В особенности это касается эффектов от ультранизких концентраций (0,005–0,015 мас. %), изучение которых представляет как научный, так и практический интерес для создания экономичных и эффективных модифицированных материалов.

Цель данной работы – комплексное исследование влияния ультранизких дозировок наночастиц  $TiO_2$  и  $ZnO$  (0,005 и 0,015 мас. %) на поведение ПА-6 в тепловом поле, включая оценку кинетики нагрева-охлаждения (косвенное определение теплопроводности) и устойчивости к длительному термоокислительному старению.

Задачи исследования включали:

- оценку эффективной теплопроводности композитов методом анализа кинетики нагрева и охлаждения;
- изучение устойчивости материалов к термоокислительному старению при длительном воздействии повышенной температуры в воздушной среде;
- установление взаимосвязи между изменением теплофизических свойств, структурными преобразованиями и механизмом замедления старения в наномодифицированном ПА-6.

**Объекты и методы исследования.** Исследования проводили, используя промышленный ПА-6 марки 210/310 «Гродноамид ПА6-ТГ» (филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот», Беларусь). Гранулы ПА-6 с размером частиц 3,1 мм (согласно паспортным данным) подвергали криогенному измельчению. В результате измельчения получали частицы ПА-6, размер которых варьировался от 0,3 до 0,5 мм. Далее измельченный ПА-6 высушивали в вакуумной сушилке при температуре 90°C в течение 2 ч.

Измельченный ПА-6 опудривался нанопорошками, после чего смесь перемешивалась механически, при этом частицы наноксидов оседали на поверхности измельченного полимера. Наночастицы могли удерживаться на поверхности полиамида как за счет сил электростатического притяжения, так и за счет взаимодействия наночастиц с макрорадикалами полиамида-6, которые образовались в процессе криогенного помола полиамида-6. Опудренный наночастицами полиамид-6 порционно загружался в загрузочный бункер экструзионной линии. Дальнейшее смешение осуществлялось в расплаве на двухшнековом экструдере Rondol Twin screw extruder 10 mm (диаметр шнеков 10 мм). Этот экструдер с однонаправленно вращающимися шнеками, входящими в зацепление, характеризуется соотношением  $L / D = 25$ , шнеки имеют смесительные и транспортирующие элементы (обеспечивающие подачу материала и его транспортировку от зоны загрузки к фильере).

Полученную нить филамента измельчали в лабораторной дробилке для получения гранул, которые в дальнейшем использовались для проведения исследований.

В качестве модифицирующих добавок вводили нанопорошки различных оксидов (NEBEI Suoyi Material Technology, КНР), характеристика которых, согласно паспортным данным, представлена в таблице.

**Характеристики исследуемых оксидов**

Параметр	TiO <sub>2</sub>	ZnO
Размер частиц, нм	20–30	30
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	20–50	20–50
pH водной суспензии	6–8	Не определялся
Содержание основного вещества, %	99,9	99,8

Из приведенных в таблице данных видно, что все исследованные наночастицы оксидов металлов имеют практически равные размеры и площади удельной поверхности, что важно для оценки роли электрического заряда на поверхности наночастиц в формировании надмолекулярной структуры и свойств нанокompозитов.

Хранение нанопорошков осуществляли в герметичной многослойной упаковке.

Инфракрасные изображения различных композитов были получены с использованием прецизионной нагревательной пластины из нержавеющей стали (DB-1AB Shanghai Kuntian Laboratory Instrument Co., Ltd., Китай) и ручного пирометра (HM@TPH10-3AUF, Hangzhou MicroShadow Software Co., Ltd., Китай) на образцах размером 20×20×3 мм.

В работе исследовали температуропроводность в прямом и обратных процессах (нагрев-охлаждение). Испытания проводились на образцах в виде пластин толщиной 3 мм. Для косвенной оценки температуропроводности использовался анализ скорости изменения температуры образцов во времени. Эксперимент включал два этапа:

1) нагрев: регистрация повышения температуры образца от начальной ( $\approx 21^\circ\text{C}$ ) на протяжении 120 с;

2) охлаждение: регистрация снижения температуры образца от начальной ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ) в течение 120 с.

Измерения температуры фиксировались с интервалом в 5 с. Основными сравнительными параметрами служили интегральные показатели: общее изменение температуры за 120 с ( $\Delta T$ ) в каждом процессе. Чем выше скорость изменения температуры ( $dT / dt$ ) в стандартизованных условиях, тем больше эффективная температуропроводность материала.

Методика оценки термоокислительного старения основана на фиксации изменения механических свойств образцов до и после воздействия повышенных температур в воздушной среде. Образцы подвергали искусственному старению в воздушной среде при 160°C.

Механические испытания (растяжение, изгиб) проводили до и после заданных периодов старения (1, 3, 5, 7, 10 сут). В качестве критериальных параметров были выбраны: предел текучести при растяжении ( $f$ ) и напряжение при изгибе ( $\sigma$ ). Коэффициенты старения рассчитывали на основе этих параметров после искусственного старения образцов в термостате при температуре 160°C в течение заданного времени: по пределу текучести при растяжении ( $K_f$ ) и изгибающему напряжению ( $K_\sigma$ ).

**Основная часть.** Результаты испытаний представлены на рис. 1. Анализ кинетики нагрева образцов (рис. 1, а) показывает, что все наномодифицированные образцы достигли более высокой температуры за фиксированное время по сравнению с чистым ПА-6 ( $\Delta T_{\text{наг}} = 79,7^\circ\text{C}$ ). Наибольший прирост тепловосприятия продемонстрировал образец с 0,015 мас. %  $\text{TiO}_2$ . При этом очевидно, что образцы с 0,015 мас. % наноксида эффективнее образцов с 0,005 мас. %.

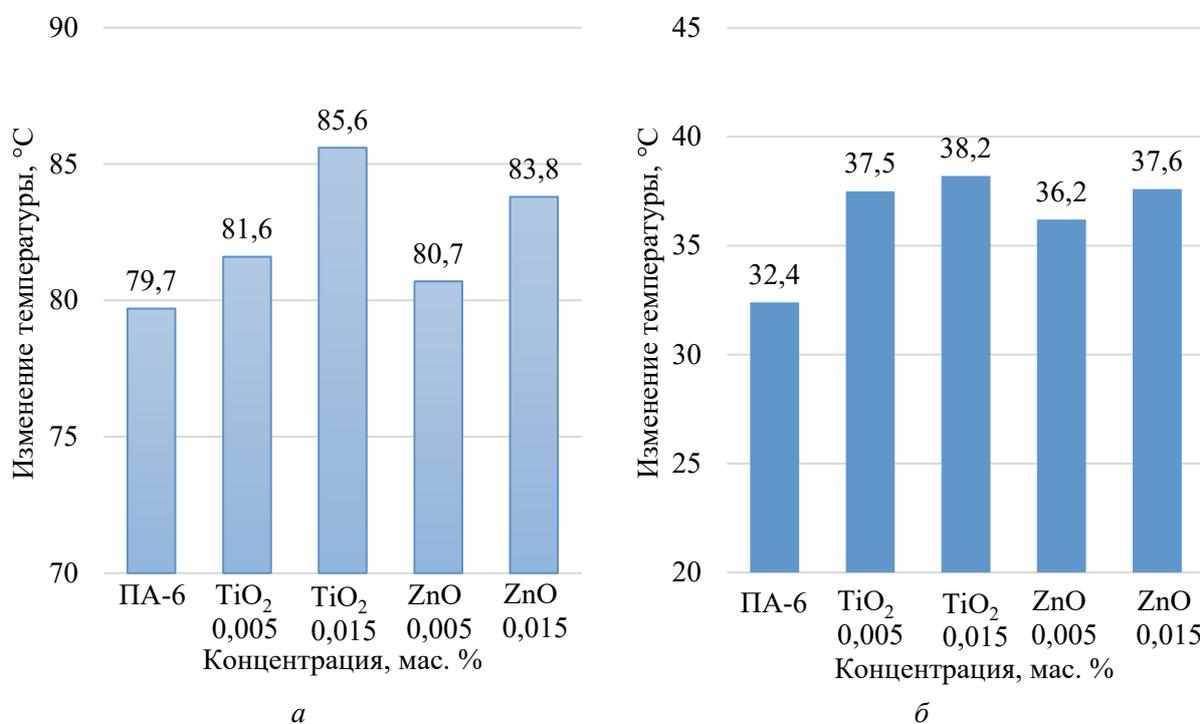


Рис. 1. Изменения температуры образцов ПА в процессе нагрева (а) и охлаждения (б)

В процессе остывания разница между материалами проявилась еще более ярко (рис. 1, б). Все модифицированные композиты остывали быстрее контрольного образца ( $\Delta T_{\text{охл}} = 32,4^\circ\text{C}$ ). Так же, как и в случае с нагревом, наибольшее изменение температуры отмечено для образца с 0,015 мас. %  $\text{TiO}_2$  ( $\Delta T_{\text{охл}} = 38,2^\circ\text{C}$ ). Аналогично проявилась и концентрационная зависимость. Таким образом, из полученных данных следует, что по скорости повышения температуры при нагреве и скорости ее снижения при охлаждении (по теплопроводности) образцы располагаются в ряду: ПА-6 + 0,015 мас. %  $\text{TiO}_2 >$  ПА-6 + 0,015 мас. %  $\text{ZnO} >$  ПА-6 + 0,005 мас. %  $\text{TiO}_2 >$  ПА-6 + 0,005 мас. %  $\text{ZnO} >$  ПА-6.

Наблюдаемый эффект согласуется с данными литературы [1–3]. Введение высокодисперсных частиц с полярной поверхностью ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ) в полярную матрицу ПА-6 приводит сразу к нескольким явлениям:

– распределенные в объеме полимера наночастицы, имея на своей поверхности электрический заряд, взаимодействуют с полярными группами макромолекул ПА-6, образуя

силы Ван-дер-Ваальса, что приводит к усилению межмолекулярного взаимодействия и образованию межфазного слоя с ограниченной подвижностью макромолекул, способствующего упорядочиванию цепи;

– частицы наноксидов выступают в роли центров гетерогенной нуклеации, повышающей общую степень кристалличности материала. Кристаллические области обладают более высокой теплопроводностью по сравнению с аморфными;

– создается перколяционная сетка (физическая сетка, образованная макромолекулами ПА-6, пронизываемая сеткой из наночастиц) для фононов даже при низком содержании наночастиц, благодаря их высокой удельной поверхности и энергетической насыщенности.

Результаты испытаний на тепловое старение представлены на рис. 2. Анализ рис. 2, *а* показывает, что коэффициент старения по пределу текучести при растяжении  $K_f$  возрастает, достигая максимума на 5–7 сут старения: у чистого ПА-6 этот показатель составил 1,39; у ПА-6 с ZnO – до 1,24; у ПА-6 с TiO<sub>2</sub> – до 1,18.

Из рис. 2, *б* следует, что коэффициент старения по напряжению на изгиб  $K_\sigma$  возрастает в той же последовательности: у чистого ПА-6 – до 1,25; у ПА-6 с ZnO – до 1,20; у ПА-6 с TiO<sub>2</sub> – до 1,18.

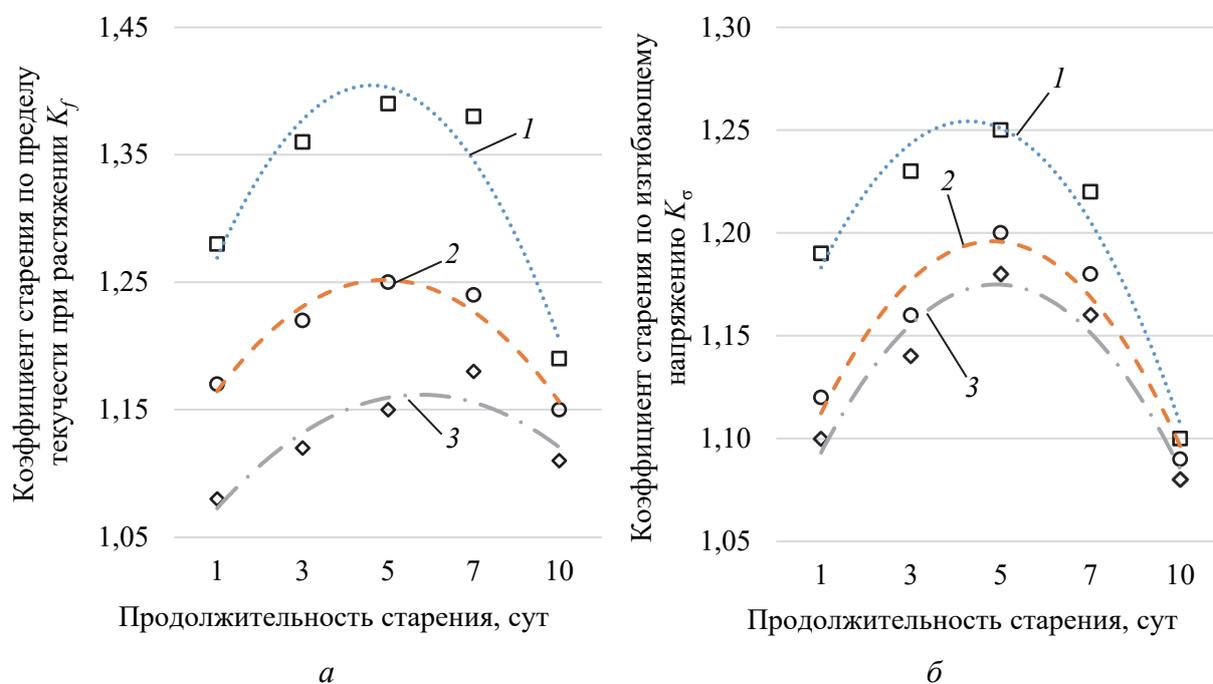


Рис. 2. Зависимость коэффициента старения по пределу текучести при растяжении  $K_f$  (*а*) и коэффициента старения по изгибающему напряжению  $K_\sigma$  (*б*) от продолжительности выдержки образцов ПА: 1 – чистый ПА-6; 2 – ZnO (0,015 мас. %); 3 – TiO<sub>2</sub> (0,015 мас. %)

Этот результат можно объяснить следующим образом. Наночастицы связывают, упрочняют часть амидных связей, по которым протекает термоокислительная деструкция с разрывом связи С–NH, поэтому доля амидных связей, подвергнутых тепловому старению, у наномодифицированных образцов меньше [1], меньше образуется макрорадикалов, в меньшей степени протекает процесс последующего сшивания и на меньшую величину возрастают  $f$  и  $\sigma$ , а следовательно, и коэффициенты старения  $K_f$  и  $K_\sigma$ .

При более длительном старении (10 сут) начинается преобладание процессов деструкции, и коэффициенты старения снижаются. Скорость этого снижения у чистого ПА-6 была выше, что свидетельствует о большем преобладании процессов разрыва связей в его структуре по сравнению с модифицированными образцами.

Таким образом, чем ниже был пик коэффициента старения, тем выше устойчивость материала к старению. По этому критерию образцы выстраиваются в ряд: ПА-6 < ПА-6 с ZnO < ПА-6 с TiO<sub>2</sub>.

Абсолютные значения прочностных характеристик после 10 сут старения подтверждают этот вывод. Предел текучести при растяжении возрастает в следующем ряду: ПА-6 – 65 МПа, ПА-6 с ZnO – 69 МПа, ПА-6 с TiO<sub>2</sub> – 72 МПа. Аналогичная зависимость наблюдается и для напряжения при изгибе: ПА-6 – 119 МПа, ПА-6 с ZnO – 124 МПа, ПА-6 с TiO<sub>2</sub> – 125 МПа.

Замедление теплового старения ПА-6 наночастицами можно объяснить следующим образом.

Аморфные области полимера пронизаны силами Ван-дер-Ваальса, образованными электрически заряженными наночастицами и полярными группами ПА-6. Силы Ван-дер-Ваальса тормозят процесс диффузии кислорода воздушной среды к амидным группам макромолекул ПА-6. Кроме того, число несвязанных (слабых) амидных групп меньше, так как часть из них связана наночастицами (их устойчивость к воздействию тепла и кислорода повышена). Силы Ван-дер-Ваальса замедляют движения звеньев макромолекул ПА-6, доля тепловой энергии увеличивает амплитуду колебаний химических связей C=O в макромолекулах, поскольку часть ее расходуется на разрыв сил Ван-дер-Ваальса. Потенциальный барьер разрыва амидных связей возрастает, что подтверждено экспериментально увеличением параметра  $E_d$  при наномодифицировании [15].

Кроме того, при наномодифицировании увеличивается степень кристалличности ПА-6 [16]. Поэтому объем полимера в аморфном состоянии меньше, кристаллы ограничивают доступ кислорода к ним, и устойчивость к тепловому старению ПА-6 также повышается.

Когда прошли глубокие (суммарные, детструкция + сшивка) процессы (после 10 сут старения), наблюдается четко выраженная тенденция по механическим показателям. Значения этих показателей убывают в ряду: ПА-6 + 0,015 мас. % TiO<sub>2</sub> > ПА-6 + 0,015 мас. % ZnO > ПА-6, что согласуется с данными по изменению коэффициентов старения (рис. 1).

Таким образом, наномодифицирование полиамида-6 частицами TiO<sub>2</sub> и ZnO эффективно подавляет термоокислительное старение, что проявляется в снижении пиковых значений коэффициентов старения по пределу текучести и напряжению изгиба.

Основными механизмами повышения устойчивости являются: создание диффузионного барьера для кислорода, взаимодействие наночастиц с полярными группами полимера и, возможно, структурные изменения (повышение кристалличности).

После завершения цикла глубокого старения (10 сут) наномодифицированные образцы сохраняют более высокие абсолютные значения прочности, что подтверждает их повышенную стабильность.

По совокупности результатов наибольший стабилизирующий эффект оказывают наночастицы TiO<sub>2</sub>, за ними следуют частицы ZnO. Чистый полиамид-6 демонстрирует наименьшую устойчивость к длительному тепловому воздействию в кислородсодержащей среде.

**Заключение.** Таким образом, еще одним независимым методом (повышением теплопроводности) доказано образование межмолекулярных взаимодействий между наночастицами и макромолекулами полимера матрицы.

Введение сверхмалых добавок (0,005–0,015 мас. %) наночастиц TiO<sub>2</sub> и ZnO в матрицу ПА-6 приводит к статистически значимому увеличению скорости теплопереноса в циклах нагрева и охлаждения, что свидетельствует о росте эффективной теплопроводности. Наибольший эффект достигается при содержании 0,015 мас. % TiO<sub>2</sub>.

Те же наночастицы в концентрации 0,015 мас. % эффективно подавляют термоокислительную деструкцию ПА-6 при 160°C, что проявляется в снижении пиковых значений

коэффициентов старения и сохранении более высоких механических характеристик после длительного теплового воздействия.

По совокупности исследованных свойств наночастицы  $\text{TiO}_2$  демонстрируют более выраженный положительный эффект по сравнению с  $\text{ZnO}$ , что позволяет рекомендовать их в качестве эффективной модифицирующей добавки для полиамида-6, работающего в условиях тепловых нагрузок.

### Список литературы

1. Mark J. E. Physical properties of polymers handbook. New York: Springer, 2007. 1072 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69002-5.
2. Sperling L. H. Introduction to physical polymer science. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 845 p. DOI: 10.1002/0471757128.
3. Choy C. L. Thermal conductivity of polymers // *Polymer*. 1977. Vol. 18, no. 10. P. 984–1004. DOI: 10.1016/0032-3861(77)90002-7.
4. Goyal R. K., Tiwari A. N. Thermal conductivity enhancement in polyamide 6 nano-composites with zinc oxide // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49, no. 19. P. 2407–2415. DOI: 10.1177/0021998314553054.
5. Li Y., Liu L., Shi Y. Crystallization behavior and thermal properties of polyamide 6/ $\text{TiO}_2$  nanocomposites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 117, no. 2. P. 767–774. DOI: 10.1002/app.32005.
6. Bocchini S., Fukushima K. Investigation on the effect of nano-fillers on the thermal degradation of polyamide 6 // *Polymer Degradation and Stability*. 2016. Vol. 134. P. 295–304. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.10.015.
7. Synthesis and thermal behaviour of layered silicate – EVA nanocomposites / M. Zanetti [et al.] // *Polymer*. 2001. Vol. 42, no. 10. P. 4501–4507. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00800-6.
8. Flammability properties of polymer nanocomposites with single-walled carbon nanotubes: effects of nanotube dispersion and concentration / T. Kashiwagi [et al.] // *Polymer*. 2005. Vol. 46, no. 2. P. 471–481. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.10.087.
9. Esthappan S. K., Kuttappan S. K., Rani J. Thermal and mechanical properties of polypropylene/titanium dioxide nanocomposite fibers // *Materials & Design*. 2012. Vol. 37. P. 537–542. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.01.038.
10. Allen N. S., Edge M. Fundamentals of polymer degradation and stabilisation. Cham: Springer, 2020. 350 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34515-0.
11. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite science and technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 243 p. DOI: 10.1002/3527602127.
12. Kim J. Y., Park H. S., Kim S. H. Thermal conductivity enhancement in polymer nanocomposites with hybrid fillers // *Carbon*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 1331–1336. DOI: 10.1016/j.carbon.2007.01.007.
13. Thermally conductive silicone rubber reinforced with boron nitride particle / W. Zhou [et al.] // *Polymer Composites*. 2007. Vol. 28, no. 1. P. 23–28. DOI: 10.1002/pc.20259.
14. Pospíšil J., Nešpůrek S. Highlights in chemistry and physics of polymer stabilization // *Polymer Degradation and Stability*. 2000. Vol. 70, no. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/S0141-3910(00)00114-4.
15. Вишневская Т. А., Прокопчук Н. Р. Влияние наночастиц оксидов металлов на механические свойства полиамида 6 // *Полимерные материалы и технологии*. 2025. Т. 11, № 2. С. 31–38. DOI: 10.32864/polymmattech-2025-11-2-31-38.
16. Изучение влияния полититанатов, вводимых на стадии синтеза полиамида 6, на его структуру и свойства / М. Ю. Трофимов [и др.] // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6 (ч. 5). С. 1098–1101.

## References

1. Mark J. E. Physical properties of polymers handbook. New York, Springer, 2007. 1072 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69002-5.
2. Sperling L. H. Introduction to physical polymer science. Hoboken, John Wiley & Sons, 2006. 845 p. DOI: 10.1002/0471757128.
3. Choy C. L. Thermal conductivity of polymers. *Polymer*, 1977, vol. 18, no. 10, pp. 984–1004. DOI: 10.1016/0032-3861(77)90002-7.
4. Goyal R. K., Tiwari A. N. Thermal conductivity enhancement in polyamide 6 nano-composites with zinc oxide. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, no. 19, pp. 2407–2415. DOI: 10.1177/0021998314553054.
5. Li Y., Liu L., Shi Y. Crystallization behavior and thermal properties of polyamide 6/TiO<sub>2</sub> nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 117, no. 2, pp. 767–774. DOI: 10.1002/app.32005.
6. Bocchini S., Fukushima K. Investigation on the effect of nano-fillers on the thermal degradation of polyamide 6. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 134, pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.10.015.
7. Zanetti M., Camino G., Thomann R., Mülhaupt R. Synthesis and thermal behaviour of layered silicate – EVA nanocomposites. *Polymer*, 2001, vol. 42, no. 10, pp. 4501–4507. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00800-6.
8. Kashiwagi T., Du F., Winey K. I., Groth K. M., Shields J. R., Bellayer S. P., Kim H., Douglas J. F. Flammability properties of polymer nanocomposites with single-walled carbon nanotubes: effects of nanotube dispersion and concentration. *Polymer*, 2005, vol. 46, no. 2, pp. 471–481. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.10.087.
9. Esthappan S. K., Kuttappan S. K., Rani J. Thermal and mechanical properties of polypropylene/titanium dioxide nanocomposite fibers. *Materials & Design*, 2012. vol. 37, pp. 537–542. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.01.038.
10. Allen N. S., Edge M. Fundamentals of polymer degradation and stabilisation. Cham, Springer, 2020. 350 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34515-0.
11. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite science and technology. Weinheim, Wiley-VCH, 2003. 243 p. DOI: 10.1002/3527602127.
12. Kim J. Y., Park H. S., Kim S. H. Thermal conductivity enhancement in polymer nanocomposites with hybrid fillers. *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 6, pp. 1331–1336. DOI: 10.1016/j.carbon.2007.01.007.
13. Zhou W., Qi S., Zhao H., Liu N. Thermally conductive silicone rubber reinforced with boron nitride particle. *Polymer Composites*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 23–28. DOI: 10.1002/pc.20259.
14. Pospíšil J., Nešpůrek S. Highlights in chemistry and physics of polymer stabilization. *Polymer Degradation and Stability*, 2000, vol. 70, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1016/S0141-3910(00)00114-4.
15. Vishnevskaya T. A., Prokopchuk N. R. Influence of metal oxide nanoparticles on the mechanical properties of polyamide 6. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2025, vol. 11, no. 2, pp. 31–38. DOI: 10.32864/polymmattech-2025-11-2-31-38 (In Russian).
16. Trofimov M. Yu., Levkina N. L., Ustinova T. P., Tikhomirova E. I. Study of the influence of polytitanates introduced at the stage of polyamide 6 synthesis on its structure and properties. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, no. 6 (part 5), pp. 1098–1101 (In Russian).

## Информация об авторах

**Вишневская Татьяна Анатольевна** – аспирант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а,

220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatyana.vish.2020@mail.ru. Scopus ID: 57216981806. ORCID: 0009-0000-4056-4001.

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com. SPIN-код: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: H-5302-2016.

### Information about the authors

**Vishnevskaya Tatiana Anatol'yevna** – PhD student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatyana.vish.2020@mail.ru. Scopus ID: 57216981806. ORCID: 0009-0000-4056-4001.

**Prokopchuk Nikolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Scientist of the Republic of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com. SPIN code: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: H-5302-2016.

*Поступила 05.12.2025*