УДК 677.494.6:678.82

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА 6 С ЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Т. А. ВИШНЕВСКАЯ, Н. Р. ПРОКОПЧУК
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Полиамид 6 (ПА6) является одним из наиболее востребованных конструкционных термопластов благодаря высоким механическим свойствам, химической стойкости, износостойкости и технологичности переработки. Широкое применение ПА6 стимулирует поиск новых методов улучшения его эксплуатационных характеристик. Перспективным направлением является модифицирование полимерной матрицы наноразмерными частицами оксидов металлов, позволяющее достичь значительного улучшения свойств при сверхмалых концентрациях наполнителя [1]. Введение наночастиц TiO_2, ZnO, Al_2O_3 и SiO_2 открывает возможности не только для упрочнения, но и для придания полимеру новых функциональных свойств [2].

Объектами исследования в данной работе являлись композиты на основе промышленного ПА6, в которые вводились сверхмалые количества наночастиц оксидов металлов различной природы: диоксид титана (TiO_2), оксид цинка (ZnO), оксид алюминия (Al_2O_3) и оксид кремния (SiO_2). Композиты получали методом механического смешения в расплаве с помощью двухшнекового экструдера с последующим формованием образцов методом литья под давлением. Содержание добавки варьировалось для выбора оптимальной концентрации. Механические свойства оценивались по стандартным методикам: определялись предел текучести, модуль упругости при растяжении и изгибе, максимальная изгибающая нагрузка, деформационные характеристики, ударная вязкость по Шарпи и Изоду как с надрезом, так и без надреза.

Проведенные комплексные исследования показали, что введение сверхмалых количеств наночастиц оксидов металлов в ПА6 приводит к значительному повышению упруго-прочностных характеристик. Для всех исследованных наночастиц была установлена экстремальная зависимость «состав – свойство»: максимальное улучшение достигается при концентрации около 0,015 мас. %. При этом наночастицы TiO_2 и ZnO проявляют практически равноценную высокую эффективность, обеспечивая рост предела текучести, модулей упругости при растяжении и изгибе, максимальной изгибающей нагрузки, а также ударной вязкости. Наночастицы Al_2O_3 и SiO_2 также повышают механические показатели, но в меньшей степени. Установлен следующий ряд эффективности наночастиц при модификации свойств ПА6: $TiO_2 \sim ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$.

Установлено, что модифицирование полиамида 6 сверхмалыми добавками наночастиц оксидов металлов является высокоэффективным методом целенаправленного регулирования механических свойств данного материала [3]. При

этом наибольшую эффективность проявляют наночастицы диоксида титана. При их введении в оптимальной дозировке достигается комплексное улучшение механических характеристик:

– предел текучести повышается на 26 %...27 %;

– модуль упругости при растяжении возрастает на 24 %...26 %;

– модуль упругости при изгибе увеличивается на 25 %...26 %;

– максимальная изгибающая нагрузка растет на 25 %...29 %;

– деформация при пределе текучести увеличивается на 23 %...25 %;

– ударная вязкость по Шарпи повышается на 22 %...40 %;

– ударная вязкость по Изоду возрастает на 28 %...30 %.

Наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) и оксида кремния (SiO_2) также повышают механические показатели, однако в меньшей степени: предел текучести возрастает на 18 %...22 %, а модуль упругости при изгибе – на 19 %...21 %.

Таким образом, установлен следующий ряд эффективности наночастиц по степени влияния на механические свойства ПА6: $TiO_2 \sim ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$.

Предложен механизм наноструктурирования ПА6 наночастицами: наночастицы, имея на своей поверхности электрический нескомпенсированный заряд, взаимодействуют с полярными амидными группами макромолекул ПА6, образуя силы Ван-дер-Ваальса; эти силы замедляют движение звеньев макромолекул полимера, повышают его устойчивость в температурно-силовых полях.

Образование дополнительных и существующих в ПА6 межмолекулярных взаимодействий подтверждено экспериментально: ростом показателя текучести расплава, температуры стеклования, энергии активации термоокислительной деструкции, степени кристалличности, времени релаксации и снижением линейной усадки и равновесного влагосодержания наноструктурированного ПА6.

Полученные результаты имеют важную практическую значимость. Созданные нанокомпозиты на основе ПА6 с улучшенным комплексом механических свойств могут найти широкое применение в автомобилестроении, аэрокосмической отрасли, производстве спортивного инвентаря, медицинских изделий и специальной защитной экипировки. Достижение существенного эффекта при сверхмалых концентрациях наполнителя важно с экономической точки зрения и позволяет сохранить технологичность переработки полимера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nichugovskiy, A.** Recent Advances in the Synthesis of Polyamine Derivatives and Their Applications / A. Nichugovskiy, G. C. Tron, M. Maslov // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 21.

2. Synthesis, Characterization, and Evaluation of the Antimicrobial and Anticancer Activities of Zinc Oxide and Aluminum-Doped Zinc Oxide Nanocomposites / M. Asif, M. Fakhar-e-Alam, M. Tahir [et al.] // Pharmaceuticals. – 2024. – Vol. 17, iss. 9.

3. **Вишневская, Т. А.** Влияние наночастиц оксидов металлов на механические свойства полиамида 6 / Т. А. Вишневская, Н. Р. Прокопчук // Полимерные материалы и технологии. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 31–38.