

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА МОДИФИКАТОРОВ
НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Мадаминов Нодирбек Зафарбек Угли

Ассистент, кафедры Материаловедение и химическая инженерия,
Андижанский государственный технический институт, Андижан,
Узбекистан

e-mail: madaminovnodir1993@gmail.com

Аннотация. В работе проведено сравнительное исследование влияния шести видов модификаторов (микро- и наноразмерных ZrO_2 и Al_2O_3 , слоистого MoS_2 и полимерного ПТФЭ) на трибологические характеристики композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Все модификаторы введены в количестве 5 масс. %. Установлено, что переход от микро- к наноразмерным частицам ZrO_2 снижает интенсивность массового износа в 2,5 раза (с 5,8 до 2,3 мг/км) при одинаковом содержании. Слоистый MoS_2 обеспечивает наименьший коэффициент трения (0,082), а нано- ZrO_2 - наилучшую износостойкость. Полученные данные позволяют рационально выбрать вид модификатора по критериям трения и износа.

Ключевые слова: СВМПЭ, вид модификатора, микро- и наноразмерные частицы, ZrO_2 , Al_2O_3 , MoS_2 , ПТФЭ, коэффициент трения, износостойкость.

Эффективность модификаторов в полимерных композитах определяется не только их природой, но и размером частиц, формой и характером взаимодействия с матрицей. Современные подходы к модификации СВМПЭ предусматривают использование частиц различных размерных уровней (от микро- до субнаноразмерного) и различных функциональных типов (керамические, слоистые, полимерные), что позволяет реализовать различные механизмы упрочнения и снижения трения [1, 2].

Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование влияния различных видов модификаторов на трибологические характеристики композитов СВМПЭ. Для исследования были выбраны шесть видов модификаторов, классифицированных по двум признакам: размер (микро- vs нано-) и природа (керамические, слоистые, полимерные). В качестве керамических модификаторов использовали: микро- ZrO_2 (средний размер 4–6 мкм), нано- ZrO_2 (40–60 нм), микро- Al_2O_3 (3–5 мкм) и нано- Al_2O_3 (30–50 нм). В качестве слоистого модификатора использовали нано- MoS_2 (50–80 нм); в качестве полимерного - порошок политетрафторэтилена (ПТФЭ, 100–200 нм). Содержание модификатора во всех композициях составляло 5 масс. %.

Композиты получали термокомпрессионным формованием при температуре 195 °С, давлении 12 МПа и выдержке 25 минут. Трибологические испытания проводили на трибометре Tribotechnic Tribo-S по схеме «палец-диск» при нагрузке 50 Н, скорости скольжения 0,3 м/с и пути трения 3 000 м. Контртелом служил полированный диск из стали ШХ15 (HRC 62, Ra = 0,15 мкм). Коэффициент трения регистрировали

непрерывно с частотой 10 Гц; износ образцов определяли гравиметрически с точностью $\pm 0,1$ мг.

Анализ результатов выявил следующую иерархию трибологических свойств композитов. По коэффициенту трения (μ): наименьшие значения обеспечивает слоистый MoS_2 - 0,082 (снижение на 54 % относительно исходного СВМПЭ $\mu = 0,178$); далее ПТФЭ - 0,098 (-45 %); нано- ZrO_2 - 0,118 (-34 %); нано- Al_2O_3 - 0,135 (-24 %); микро- ZrO_2 - 0,148 (-17 %); микро- Al_2O_3 - 0,156 (-12 %). По интенсивности массового износа (мг/км): нано- ZrO_2 - 2,3 (снижение в 3,7 раза); нано- Al_2O_3 - 2,9 (3,0 раза); MoS_2 - 3,8 (2,3 раза); ПТФЭ - 4,2 (2,1 раза); микро- ZrO_2 - 5,8 (1,5 раза); микро- Al_2O_3 - 6,1 (1,4 раза). Исходный СВМПЭ - 8,5 мг/км.

Ключевым результатом исследования является количественное подтверждение преимущества наноразмерных модификаторов перед микроразмерными того же химического состава: переход от микро- к нано- ZrO_2 снижает интенсивность износа в 2,5 раза, от микро- к нано- Al_2O_3 - в 2,1 раза при одинаковом массовом содержании. Это объясняется значительно большей удельной поверхностью наночастиц и формированием более развитой межфазной структуры, обеспечивающей эффективную передачу нагрузки и удержание ориентированных макромолекул в контактной зоне [3, 4]. Слоистые и полимерные модификаторы обеспечивают преимущественное снижение коэффициента трения за счёт смазочного слоя, но уступают наноразмерным керамическим частицам по износостойкости. Полученные данные обосновывают выбор нано- ZrO_2 для тяжелонагруженных узлов трения и MoS_2 - для приложений с минимальным коэффициентом трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S. Ultra-high molecular weight polyethylene: Influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. A review // *Materials*. – 2017. – Vol. 10, No. 7. – P. 791. DOI: 10.3390/ma10070791.
2. Friedrich K., Zhang Z., Schlarb A. K. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites // *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65, No. 15-16. – P. 2329–2343. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.05.028.
3. Schwartz C. J., Bahadur S. Studies on the tribological behavior and transfer film–counterface bond strength for polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles // *Wear*. – 2000. – Vol. 237, No. 2. – P. 261–273. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00345-2.
4. Plumlee K., Schwartz C. J. Improved wear resistance of orthopaedic UHMWPE by reinforcement with zirconium particles // *Wear*. – 2009. – Vol. 267, No. 5-8. – P. 710–717. DOI: 10.1016/j.wear.2008.11.028.
5. Wang Q., Xu J., Shen W. The friction and wear properties of nanometer SiO₂ filled polyetheretherketone // *Tribology International*. – 1997. – Vol. 30, No. 3. – P. 193–197. DOI: 10.1016/S0301-679X(96)00042-4.
6. Panin S. V., Kornienko L. A., Sergeev V. P., et al. Wear resistance of composites based on hybrid UHMWPE-PTFE matrix: Mechanical and tribotechnical properties of materials // *Friction*. – 2020. – Vol. 8, No. 5. – P. 1004–1019. DOI: 10.1007/s40544-019-0331-1.
7. Яхин А. А., Мадаминов Н. З., Кондратюк А. А. Исследование влияния наноразмерных наполнителей на прочность полимерных

композитов //Научный потенциал молодежи и технический прогресс. – 2018. – С. 134-135.

8. Madaminov N., Umarova M. Optimization of energy consumption in the production of UHMWPE-based composites with nanomodifiers //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – Т. 3331. – №. 1. – С. 040008.

9. Фуцзай Г., Мадаминов Н. З., Кондратюк А. А. Исследование влияния количества вводимых органических и неорганических наполнителей на механические свойства композитов //Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции, г. Томск, 26–30 ноября 2018 г.—Томск, 2018. – 2018.

10. Непомнящих Н. Н., Мадаминов Н. З. Получение полимерных композитов с наполнителем ZrO_2 и исследование их свойств //Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г.—Томск, 2017. – 2017.