

**РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ  
ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА С ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

*НГУЕН ДЫК АНЬ<sup>1</sup>, С. В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, Л. А. КОРНИЕНКО<sup>2</sup>, Л. Р. ИВАНОВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [gau\\_haman@tpu.ru](mailto:gau_haman@tpu.ru)

Композиты на основе полимерных матриц широко применяются в качестве материалов для трибосопряжений благодаря их высокой трибологической эффективности и химической стабильности. Среди перспективных полимерных матриц полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) позиционируется как высокоэффективный термопласт, обладающий высокой прочностью, химической и термической стойкостью, обеспечивающих его широкое применение в машиностроении и в медицине. Однако, являясь высокопрочным и термостойким в широком интервале температур ( $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+260^{\circ}\text{C}$ ), ПЭЭК обладает низкой износостойкостью. В последнее время разрабатываются композиты на основе полиэфирэфиркетона. Тип и размер наполнителей определяются областью применения и средой использования композиций. Типы наполнителей (состав, форма, размеры) определяют механические и трибологические свойства композитов на основе полимера. Твердосмазочные частицы добавляют в ПЭЭК для уменьшения коэффициента трения и износа композитов на его основе. В научной литературе обсуждаются возможности повышения износостойкости ПЭЭК введением различных твердосмазочных наполнителей [1-3]. Показано, что низкий износ и коэффициент трения обеспечиваются за счет формирования пленки переноса на поверхности контртела.

В настоящей работе с целью функционирования наполнителя в роли твердой смазки исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе ПЭЭК с различными твердосмазочными частицами (ПТФЭ, графит,  $\text{MoS}_2$ , нитрид бора) в условиях сухого трения скольжения. Проведен сравнительный анализ эффективности твердосмазочных наполнителей в формировании триботехнических свойств полимерных композитов на основе ПЭЭК.

Использовали порошок ПЭЭК фирмы Victrex (450PF) со средним размером частиц 50 мкм. В качестве наполнителей использовали фторопласт Ф-4ПН-20 (производитель АО Галополимер, размер частиц 6-20 мкм), коллоидный графит ( $\varnothing$  1÷4 мкм), дисульфид молибдена марки МВЧ-1 ( $\varnothing$  1÷7 мкм) и нитрид бора НБ (марка «В», размер частиц 10 мкм). Композиты на основе ПЭЭК получали методом горячего прессования при давлении 15 МПа и температуре спекания  $400^{\circ}\text{C}$  при скорости последующего охлаждения  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

Твердость по Шору Д определяли на приборе Instron 902 в соответствии с ASTM D 2240. Испытание на растяжение проводили с помощью электромеханической испытательной машины Instron 5582 согласно ASTM D638-10.

Испытание образцов на изнашивание в режиме сухого трения проводили по схеме «шар-на-диске» при нагрузке  $P=10$  Н и скорости скольжения  $V=0.3$  м/с на трибометре CSEM CH-2000 в соответствии с ASTM G99. Диаметр контртела в форме шарика из стали ШХ15 составлял 6 мм. Путь трения равен 3 км, радиус траектории вращения - 10 мм. Таким образом круговая частота вращения составляла 286 об/мин.

Степень кристалличности оценивали на совмещенном анализаторе SDT Q600 (Thermo Fisher Scientific). Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

В таблице 1 приведены механические характеристики композитов на основе ПЭЭК, наполненных 10 вес. % различных твердосмазочных наполнителей. Из таблицы следует, что твердость по Шору Д уменьшается при наполнении ПТФЭ. Добавление других

твердосмазочных частиц ( $\text{MoS}_2$ , графит, НБ) незначительно изменяет твердость материалов. Модуль упругости уменьшается при добавлении ПТФЭ. Введение других частиц ( $\text{MoS}_2$ , графит, НБ) позволяет повысить модуль упругости на 25%. Предел прочности и удлинение при разрыве заметно падает при наполнении ПЭЭК твердосмазочными микрочастицами.

Таблица 1 - Механические свойства композитов на основе ПЭЭК, наполненных твердосмазочными частицами

Материалы	Плотность г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору Д	Модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрыве, %
ПЭЭК	1,3	80,1±1,17	2840±273	106,9±4,7	21,6±7,2
10%ПТФЭ	1,32	77,3±0,24	2620±158	83,9±2,4	5,0±0,8
10% $\text{MoS}_2$	1,42	80,8±0,3	3412±25	96,8±4,7	4,75±1,4
10%графит	1,36	79,3±0,7	3565±33	87,1±4,9	3,7±0,8
10% BN	1,36	79,8±0,3	3623±62	71,0±1,0	2,8±1,0

Результаты трибоиспытания показаны на рисунке 1. Видно, что добавление в ПЭЭК 10 вес. % ПТФЭ позволяет повысить износостойкость в 4 раза по сравнению с чистым ПЭЭК. Добавление 10 вес. % графита обеспечивает повышение износостойкости композитов на основе ПЭЭК в 2 раза. При этом износостойкость композитов ПЭЭК с 10 вес. %  $\text{MoS}_2$  и НБ даже уменьшается по сравнению с чистым ПЭЭК.

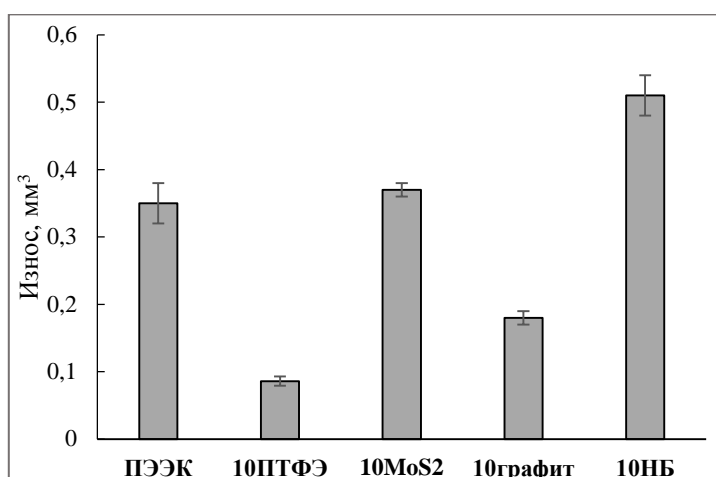


Рисунок 1 - Объемный износ ПЭЭК и его композитов с твердосмазочными наполнителями

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 16-48-700192\_p\_a, а также гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8.

#### Список литературы

1. V.J. Briscoe, Y. Lin Heng, T.A. Stolarski, The friction and wear of polytetrafluoroethylene-polyetheretherketone composites: an initial appraisal of the optimum composition. *Wear*, 108 (1986), pp. 357-374
2. Z.P. Lu, K. Friedrich, High temperature polymer composites for applications as sliding elements. *Materials*, 28 (1997), pp. 116-123
3. M.Zalaznik, M.Kalin, S.Novak, G.Jakša, Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK. *Wear*, Vol. 364–365 (2016), pp. 31-39.