

**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА (ПЭС) В УСЛОВИЯХ ЛИНЕЙНОГО ТРИБОКОНТАКТА**

*Д.Г.БУСЛОВИЧ<sup>1</sup>, Ч. ХЭ<sup>2</sup>, Л.А. КОРНИЕНКО<sup>1</sup>, С.В.ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

E-mail: [buslovich@ispms.ru](mailto:buslovich@ispms.ru)

Полиэфирсульфон (ПЭС), один из видов полисульфона, также является превосходным высокоэффективным инженерным пластиком с высокой температурой стеклования ( $T_g$ ) 225 °С и температурой эксплуатации до 180 °С. Кроме того, ПЭС обладает относительно высокой прочностью и модулем упругости, хорошей усталостной прочностью и стабильностью размеров, а также высокой химической, огне- и радиационной стойкостью и т.д. [1].

Однако механические и трибологические свойства ПЭС должны быть улучшены, чтобы соответствовать современным требованиям к изделиям из полимеров [2]. Для повышения износостойкости полиэфирсульфона используются различные методы, такие как введение нано-и микронных наполнителей, химическая модификация, обработка поверхности ионизирующим излучением, механическая активация и т.д. [3].

В настоящей работе проведено исследование трибологических характеристик композитов на основе ПЭС, наполненных углеродными волокнами различной длины. Использовали металлическое (сталь ШХ15) контртело при линейном контакте (схема «вал-колодка»).

В работе в качестве материала матрицы использовали порошок ПЭС (“Solvay”, Brussels, Belgium) со средним размером частиц 10 мкм. В качестве наполнителей используются следующие типы материалов: молотые углеродные волокна (МУВ),  $l=200$  мкм,  $\varnothing=7,5$  мкм (ООО «ЗУКМ», Челябинск); рубленные углеродные волокна (РУВ),  $l=2$  мм (ООО «ЗУКМ», Челябинск); также использовали углеродные нановолокна «Таунит» длиной 2-3 мкм, диаметром 60 нм (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия).

Испытания на трение осуществлялись по схеме «вал-колодка» по ASTM G 77-98, контртело сделано из стали ШХ15. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда 10\*16\*6,4 мм с отклонением  $\pm 0,05$  мм. Диаметр вала 35 мм; нагрузка  $F_n=60$  Н; скорость скольжения  $v=0,3$  м/с; дистанция скольжения 1 км.

В таблице 1 приведены коэффициенты трения и интенсивности изнашивания всех исследованных композитов в условиях металлополимерного трибосопряжения (схема испытаний «вал-колодка»). Видно, что введение 1 % УНВ увеличивает интенсивность износа из-за неравномерного распределения углеродных нановолокон в матрице. Введение 10 % углеродных волокон снижает коэффициент трения композита в 2,5 раза, а износостойкость - в 10 раз вне зависимости от размера волокна.

Таблица 1 – Коэффициент трения и интенсивность изнашивания ПЭС и композитов на его основе (схема «вал-колодка», режим  $P = 60$  Н,  $V = 0,3$  м/с)

Состав (вес.%)	Коэффициент трения $f$	Интенсивность изнашивания $I$ , ( $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /Н·м)	Температура $T$ , °С
ПЭС	0.577±0.037	66.68±2.55	32.11±1.21
ПЭС/1 УНВ	0.560±0.025	108.41±1.62	39.85±1.50
ПЭС/10 УВ <sub>200мкм</sub>	0.197±0.033	6.92±1.43	25.75±1.27
ПЭС/10 УВ <sub>2мм</sub>	0.238±0.034	6.06±0.98	27.17±0.46

На рисунке 1 приведены зависимости коэффициентов трения всех исследованных композитов от дистанции испытаний. Коэффициент трения чистого ПЭС стабильный и составляет 0,55. Коэффициент трения композита "ПЭС/1 УНВ" изменяется от уровня 0,2 в начале трибоиспытаний до величины 0,55 и далее не меняется, рисунок 1 (б). Это означает, что на поверхности образца не образуется трибослой.

Изменение во времени коэффициента трения двухкомпонентного композита "ПЭС/10 УВ<sub>200мкм</sub>" показывает большие осцилляции в первой половине дистанции, а затем становится стабильно низким, рисунок 1(в). Судя по кинетике изменения коэффициента трения, сформировался сплошной трибослой. Это означает, что состав и структура композита обеспечивают возможность его формирования и закрепления.

На поверхности двухкомпонентного композита "ПЭС/10УВ<sub>2мм</sub>" тоже образуется трибослой, но коэффициент трения остается повышенным, рисунок 1 (г), что связано с неустойчивостью (слабой способностью к закреплению) трибослоя.

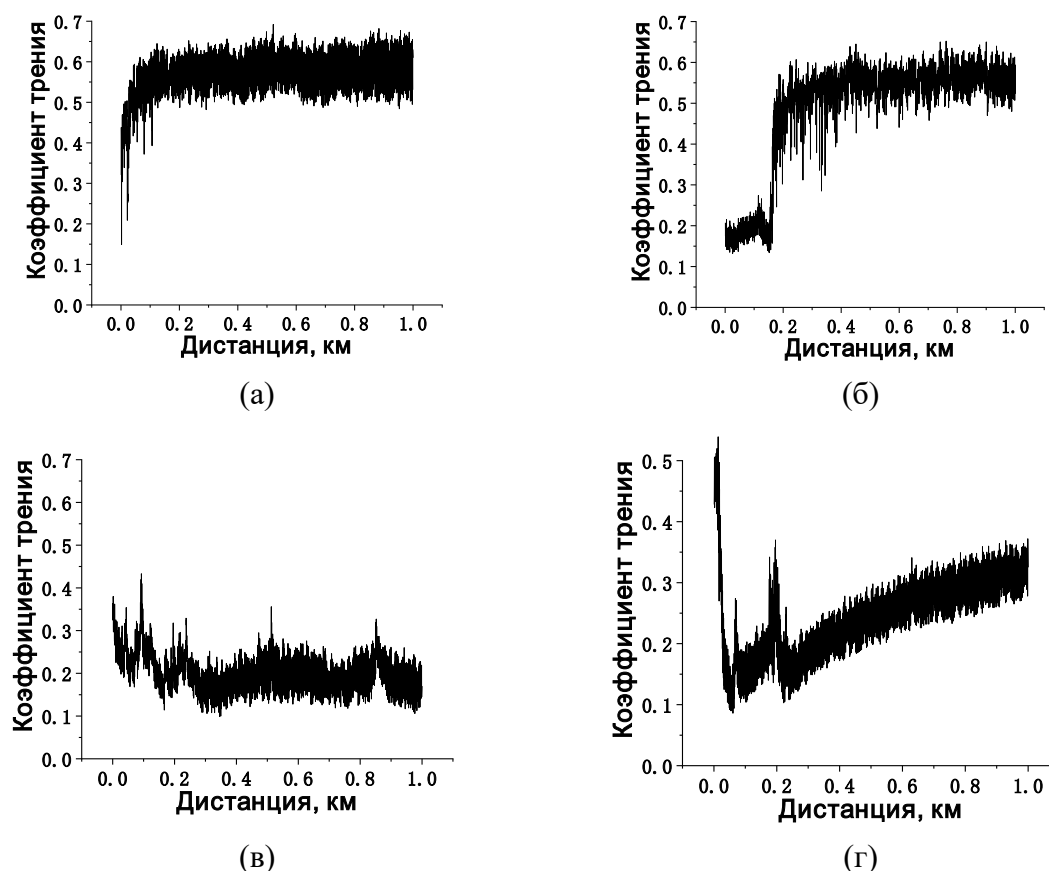


Рисунок 1 – Временная зависимость в значениях  $f$  для ПЭС и композитов на его основе:  
 а) ПЭС, б) ПЭС/1 УНВ, в) ПЭС/10 УВ<sub>200мкм</sub>, г) ПЭС/10 УВ<sub>2мм</sub>

Как видно из рисунка 2 (з, е, л, м), глубина дорожки трения композитов с введением углеродных волокон двух разных длин уменьшается на порядок благодаря трибослою, образованному углеродными волокнами на поверхности композита.

В условиях нагружения  $P = 60$  Н,  $V = 0,3$  м/с в ПЭС/10УВ на поверхности износа наблюдаются разрушенные УВ, рисунок 2(з), а коэффициент трения быстро уменьшается до 0,197, рисунок 1 (в), при достаточно низкой интенсивности износа ( $I \sim 6,92 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н\*м). Это означает, что сформировался трибослой, армированный разрушенными УВ.

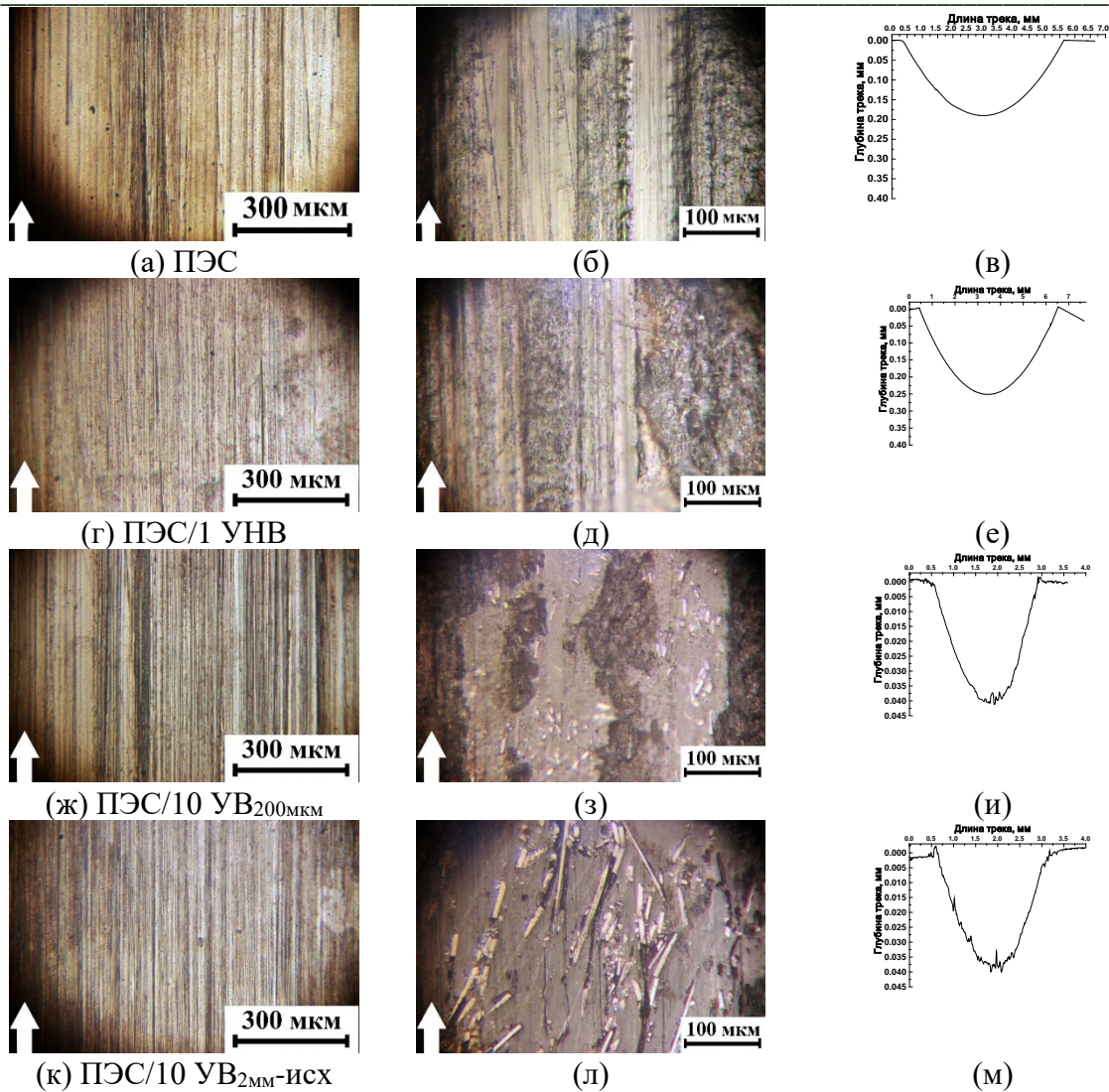


Рисунок 2 – Топография поверхностей износа полимерных образцов, металлического контртела и профили дорожки трения после дистанции испытаний 1 км

Исследованы трибологические характеристики композитов на основе ПЭС, наполненных углеродными волокнами, в условиях линейного полимерного трибосопряжения. Введение углеродных волокон двух различных длин приводило к образованию на поверхности скольжения композита трибослоя, который защищал его от изнашивания, снижая интенсивность износа до 10 раз.

**Благодарность:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2022-0002

#### Список литературы

1. Fink J.K. High performance polymers. - William Andrew, Norwich, NY, 2008. – 481 p. ISBN 9780815515807
2. Yuan H., Zhang S., Lu C. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent – free polyamic acid sizing // Applied Surface Science. – 2013. – № 279. – P. 279–284.
3. Mamah S.C. Recent development in modification of polysulfone membrane for water treatment application // Journal of Water Process Engineering. – 2021. – № 40. – P. 101835.