

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 678.073:661.481

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.013

**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ  
ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРИМИДА В УСЛОВИЯХ  
ТОЧЕЧНОГО И ЛИНЕЙНОГО ТРИБОКОНТАКТОВ****Сергей Викторович Панин<sup>1†</sup>, Дмитрий Геннадиевич Буслович<sup>2</sup>, Цзянкунь Ло<sup>3</sup>,  
Людмила Александровна Корниенко<sup>4</sup>, Владислав Олегович Алексенко<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 4, 5</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический 2/4, 634055, Томск, Россия<sup>1, 3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия<sup>1</sup> svp@ispms.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7623-7360><sup>2</sup> buslovichdg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7464-9628><sup>3</sup> jiangkun169@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3097-6149><sup>4</sup> rosmc@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2064-9862><sup>5</sup> vl.aleksenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4375-9132>

**Аннотация.** Исследованы структура, механические и трибологические характеристики композитов на основе полиэфиримида (ПЭИ), армированного длинными углеродными волокнами, и одновременно наполненными твердосмазочными наполнителями различной природы (ПТФЭ, графит), в условиях точечного и линейного трибосопряжений. Показано, что повышение трибологических свойств трехкомпонентных армированных, антифрикционных композитов на основе ПЭИ в условиях точечного и линейного трибоконтатов обусловлено формированием пленки переноса/трибослоя, закономерности формирования которых определяются трибоактивностью модифицирующего (твердосмазочного) наполнителя и условиями трибонагружения (схемой трибоконтакта). Показана определяющая роль схемы и условий трибоиспытаний (точечный контакт, схема «шар-по-дису» и линейный контакт, схема «вал-колодка») на сопротивление изнашиванию трехкомпонентных высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПЭИ. При точечном контакте и низкой шероховатости контртела  $R_a=0,02$  мкм в трехкомпонентных композитах более эффективным твердосмазочным компонентом является ПТФЭ. При линейном контакте и высокой шероховатости контртела  $R_a=0,2$  мкм более эффективными являются частицы графита, поскольку позволяют сформировать стабильный трибослой на поверхности скольжения композитов при металло-полимерном трибосопряжении. Закономерности формирования трибослоя определяются трибоактивностью модифицирующего (твердосмазочного) наполнителя и условиями трибонагружения. Условия эксплуатации разрабатываемых высокопрочных антифрикционных композитов определяются различием межслоевых энергий использованных в работе твердосмазочных (слоистых) наполнителей, их эффективностью в формировании пленки переноса/трибослоя композитов на основе ПЭИ и условиями нагружения.

**Ключевые слова:** полиэфиримид, углеродные волокна, политетрафторэтилен, графит, модуль упругости, коэффициент трения, износ, пленка переноса.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН проект FWRW-2021-0010.

**Для цитирования:** Панин С.В., Буслович Д.Г., Ло Цзянкунь, Корниенко Л.А., Алексенко В.О. Трибологические характеристики трехкомпонентных твердосмазочных композитов на основе полиэфиримида в условиях точечного и линейного трибоконтатов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 402–410. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.013.

Original article

## TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THREE-COMPONENT SOLID-LUBRICANT COMPOSITES BASED ON POLYETHERIMIDE UNDER CONDITIONS OF POINT AND LINEAR TRIBOCONTACTS

Sergey V. Panin<sup>1†</sup>, Dmitry G. Buslovich<sup>2</sup>, Jiangkun Luo<sup>3</sup>, Lyudmila A. Kornienko<sup>4</sup>,  
Vladislav O. Alexenko<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 4, 5</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Akademicheskii Pr. 2/4, 634055, Tomsk, Russia

<sup>1, 3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia

<sup>1</sup> svp@ispms.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7623-7360>

<sup>2</sup> buslovichdg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7464-9628>

<sup>3</sup> jiangkun169@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3097-6149>

<sup>4</sup> rosmc@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2064-9862>

<sup>5</sup> vl.aleksenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4375-9132>

**Abstract.** The structure, mechanical and tribological characteristics of composites based on polyetherimide (PEI) reinforced with long carbon fibers and simultaneously filled with solid lubricating fillers of various nature (PTFE, graphite) under conditions of point and linear tribological conjugations have been studied. It is shown that an increase in the tribological properties of three-component reinforced, antifriction composites based on PEI under the conditions of point and linear tribocontacts is due to the formation of a transfer film/tribolayer, the patterns of formation of which are determined by the triboactivity of the modifying (solid lubricating) filler and the conditions of triboloading (tribocontact scheme). The determining role of the scheme and conditions of tribological testing (point contact, "ball-on-disk" scheme and linear contact, "block-on-ring" scheme) on the wear resistance of three-component high-strength antifriction composites based on PEI is shown. With point contact and low roughness of the counterbody  $R_a = 0.02 \mu\text{m}$  in three-component composites, PTFE is a more effective solid lubricating component. With linear contact and high roughness of the counterbody  $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ , graphite particles are more effective, since they allow the formation of a stable tribolayer on the sliding surface of composites during metal-polymer triboconjugation. The formation patterns of the tribolayer are determined by the triboactivity of the modifying (solid-lubricating) filler and the conditions of triboloading. The operating conditions of the developed high-strength antifriction composites are determined by the difference in the interlayer energies of the solid lubricating (layered) fillers used in the work, their efficiency in the formation of a transfer film/tribolayer of PEI-based composites, and loading conditions.

**Keywords:** polyetherimide, carbon fibers, polytetrafluoroethylene, graphite, elastic modulus, coefficient of friction, wear, transfer film.

**Acknowledgements:** The work was performed according to the Government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0010.

**For citation:** Panin, S. V., Buslovich, D. G., Luo, J., Kornienko, L. A. & Alexenko, V. O. (2022). Tribological characteristics of three-component solid-lubricant composites based on polyetherimide under conditions of point and linear tribocontacts. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 402–410. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.013.

### Введение

Высокомолекулярные термопластичные полиимиды (ПИ, ПЭИ), обладая высокими механическими свойствами в широком интервале температур, привлекают разработчиков полимерных композитов с точки зрения антифрикционных применений. Однако, несмотря на все присущие им достоинства, ненаполненные полиимиды практически не применяются для изготовления деталей трибоузлов, поскольку в ненаполненном виде по причине высокой прочности и коэффициента трения испытывают

значительный износ в условиях сухого трения скольжения [1, 2]. Решение данной проблемы достигается посредством введения ряда твердосмазочных наполнителей, позволяющих уменьшать износ и коэффициент трения сопряженных деталей в узлах трения. К наиболее распространенным (бюджетным) твердосмазочным материалам для наполнения полимерных матриц относятся политетрафторэтилен (ПТФЭ) [3], графит (С) [4], дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) [5]. Многочисленные исследования трибологических характеристик композитов на основе полиимидов показали, что независимо

от типов вводимых наполнителей неизменным условием повышения сопротивления изнашиванию является формирование пленки переноса и ее надежная фиксация на контртеле [6-8]. Поэтому вопрос формирования и закрепления пленки переноса на контртеле/поверхности скольжения композита является определяющим в проектировании эксплуатационных характеристик антифрикционных композитов (в частности, на основе ПЭИ). В обзорной работе [9] показано, что формирование и закрепление этой пленки на поверхностях сопряжения трибоконтакта определяется не только свойствами (природой) наполнителя, но во многом и схемой трибоконтакта (точечный – «шар-диск», линейный – «вал-колодка», плоскостной «палец-диск»). В настоящей работе исследованы трибологические характеристики композитов на основе термопластичного ПЭИ, армированного рубленными углеродными волокнами (УВ) и наполненного твердосмазочными частицами различной природы (органическим ПТФЭ и кристаллическим С), при испытании по металлическому контртелу при точечном («шар-диск») и линейном контакте («вал-колодка») с целью выработки практических рекомендаций по эксплуатации разрабатываемых высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПЭИ в узлах трения различного назначения.

### Материалы и методы исследований

В работе использовали порошок термопластичного ПЭИ (Solver, Jiande, China) со средним размером частиц 16 мкм. В качестве наполнителей использовали мелкодисперсный порошок «Флуралит», получаемый термическим разложением фторопласта Ф-4 (ООО – Флуралит синтез, средний диаметр менее 3 мкм), коллоидный графит С-1 ( $\varnothing 1 \div 4$  мкм), рубленое углеродное волокно УВ длиной 2 мм (Tenax®-A, Teijin Carbon Europe GmbH, Wuppertal, Germany).

Смешение порошков полимерного связующего (ПЭИ) и наполнителей проводили в планетарной шаровой мельнице МР/0,5\*4 (ООО «Техноцентр», Рыбинск) с предварительным диспергированием компонентов в ультразвуковой ванне ПСБ-Галс 1335-05 (ЦУО ПСБ-Галс, Москва).

Объемные заготовки полимерных композитов изготавливали горячим прессованием порошковых смесей при давлении 15 МПа и температуре 170 °С с использованием лабораторной установки на базе гидравлического пресса

МС-500 (ООО «НПК ТехМаш», Москва), оборудованного размыкаемой кольцевой печью с цифровым управлением температурным режимом (ООО «ИТМ», Томск). Охлаждение заготовок после выдержки под давлением в течение 30 минут осуществлялось без снятия нагрузки при скорости охлаждения  $\Delta T = 5$  °С/мин.

Механические свойства образцов определяли на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при разрывных испытаниях образцов в форме двойной лопатки при количестве образцов одного типа не менее 4.

Испытание образцов на изнашивание в режиме сухого трения проводили по схеме «шар-по-дису» при нагрузке  $P=5$  Н и скорости скольжения  $V=0,3$  м/с на трибометре CSEM CH-2000 (ASTM G99). Максимальное удельное давление составляло  $P_{\max}=66,9, 88,3, 102,1, 115,8$  МПа. В трибологических испытаниях использованы два типа контртел в форме шарика из стали ШХ15 и керамики  $Al_2O_3$ . Диаметр контртел составлял 6 мм. Путь испытания равен 1 км, радиус траектории триботрека – 16 мм.

Испытание по определению износостойкости проводились на машине трения 2070 СМТ-1 (ПО «Точприбор», г. Иваново) по схеме «вал – колодка» в соответствии со стандартом ASTM G 77–98. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда  $10*16*6,4$  мм с отклонением  $\pm 0,05^\circ$  мм. На образец действовала нагрузка  $P=60-180$  Н (контактное давление  $P_{\max}$  до 66,9 МПа и 115,8 МПа, соответственно), и скорость скольжения задавалась равной  $V=0,3-0,5$  м/с. Контртело (подшипник) из стали ШХ15 в форме диска диаметром 35 мм. Шероховатость поверхности контртела составляла 0,23 мкм с отклонением  $\pm 0,03^\circ$  мкм. Для измерения температуры контртела использовали ИК-термометр СЕМ DT-820 (Shenzhen Everbest Machinery Industry Co., Ltd., Китай).

Объемный износ оценивался по профилю дорожки трения при помощи контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor, США). Измерения профиля дорожки трения производили сразу после испытания. Проводили 6 измерений в разных местах образца, и далее определяли среднее значение.

Исследование топографии поверхности дорожек трения проводили на оптическом микроскопе Neophot 2 (Carl Zeiss, Jena), оборудованном цифровой камерой Canon EOS 550D (Canon Inc., Япония).

Структурные исследования выполняли на растровом электронном микроскопе «LEO EVO 50» (Carl Zeiss, Германия) при ускоряющем на-

пряжении 20 кВ на поверхности скола образцов с надрезом, разрушенных после выдержки в жидком азоте.

### Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены физико-механические свойства горячепрессованных ПЭИ-композитов. Видно, что ключевые механические характеристики ПЭИ заметно возрастают

при добавлении 10 вес.% рубленных УВ: модуль упругости увеличивается в 2,0 раза, предел прочности в 1.2 раза. Последующее добавление в двойную смесь «ПЭИ+УВ» твердосмазочных частиц незначительно снижает деформационно-прочностные характеристики. Удлинение при растяжении всех композитов уменьшилось в 4-5 раз и приобрело хрупкий характер.

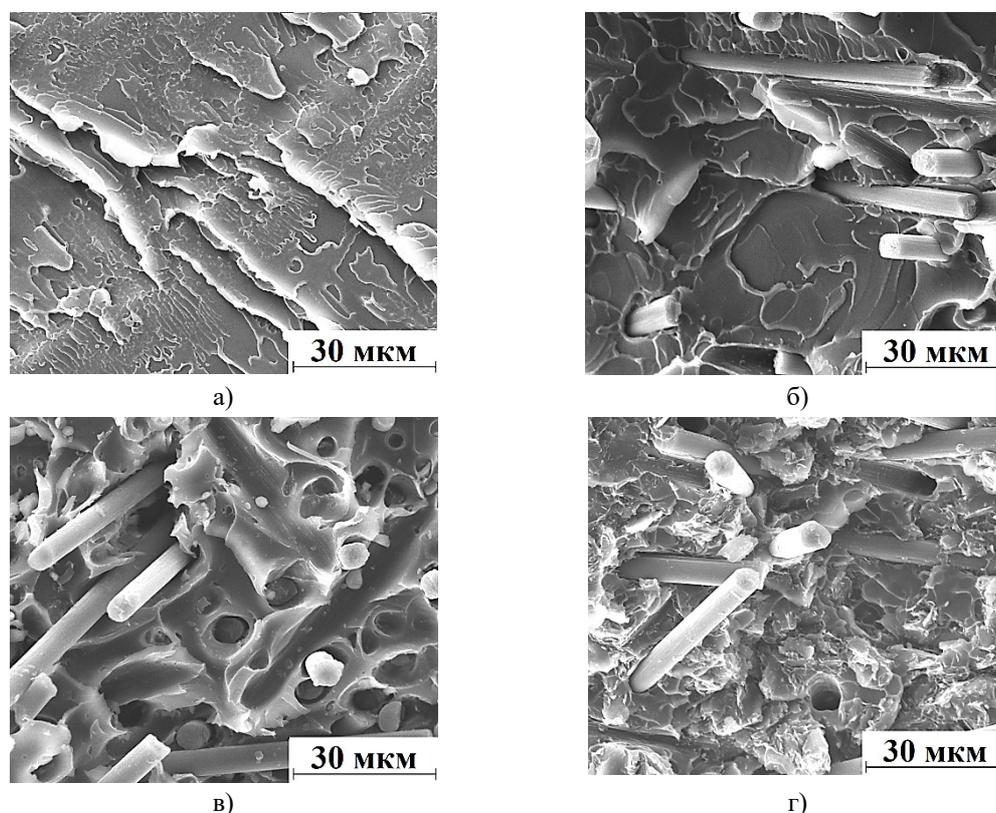
**Таблица 1.** Физико-механические свойства ПЭИ и композитов на его основе

**Table 1.** Physical and mechanical properties of PEI and PEI-based composites

| Состав, вес. %  | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Твердость по Шору D | Модуль упругости $E$ , МПа | Предел прочности $\sigma_B$ , МПа | Удлинение $\varepsilon$ , % |
|-----------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| ПЭИ             | 1,26                         | 79,9±0,3            | 3,12±0,15                  | 123,1±0,5                         | 16,1±1,2                    |
| ПЭИ/10УВ        | 1,31                         | 81,4±0,3            | 6,54±0,43                  | 153,2±12,5                        | 3,7±0,6                     |
| ПЭИ/10УВ/10PTFE | 1,36                         | 79,0±0,3            | 6,17±0,26                  | 117,3±8,0                         | 3,1±0,3                     |
| ПЭИ/10УВ/10С    | 1,37                         | 80,6±0,2            | 6,37±0,16                  | 101,4±2,6                         | 2,8±0,1                     |

На рис.1 приведены фотографии структуры ПЭИ и композитов на его основе. В УВ-композите армирующие включения распределены достаточно однородно по объему (рис.1б).

Твердосмазочные наполнители (ПТФЭ, С) также равномерно и без признаков агломерации распределены в армированном композите «ПЭИ+УВ» (рис.1в,г).



**Рис.1.** РЭМ-микрофотографии ПЭИ (а) и композитов ПЭИ/10УВ (б), ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ (в), ПЭИ/10УВ/10С (г)

**Fig.1.** SEM-micrographs of PEI (a) and composites PEI/10CF (b), PEI/10CF/10PTFE (c), PEI/10CF/10C (d)

Далее исследованы трибологические характеристики антифрикционных композитов на основе ПЭИ, наполненные твердосмазочными наполнителями. В таблице 2 приведены коэффициенты трения и интенсивности изнашивания всех исследованных композитов в условиях металлополимерных трибосопряжений (схема испытаний «шар-по-дису»). Из таблицы следует, что все наполнители приводят к снижению коэффициента трения, а интенсивность изнашивания при наполнении ПТФЭ снижается

в ~850 раз в металло-полимерном сопряжении. Введение неорганического твердосмазочного наполнителя (С) снижает интенсивность износа в ~27 раз при металло-полимерном сопряжении по сравнению с ненаполненным полимером. Другими словами, наименьшим износом и коэффициентом трения (0,045) обладает трехкомпонентный композит, наполненный ПТФЭ, а коэффициент трения композита ПЭИ/10УВ/10С близок коэффициенту трения бинарного композита (0,228).

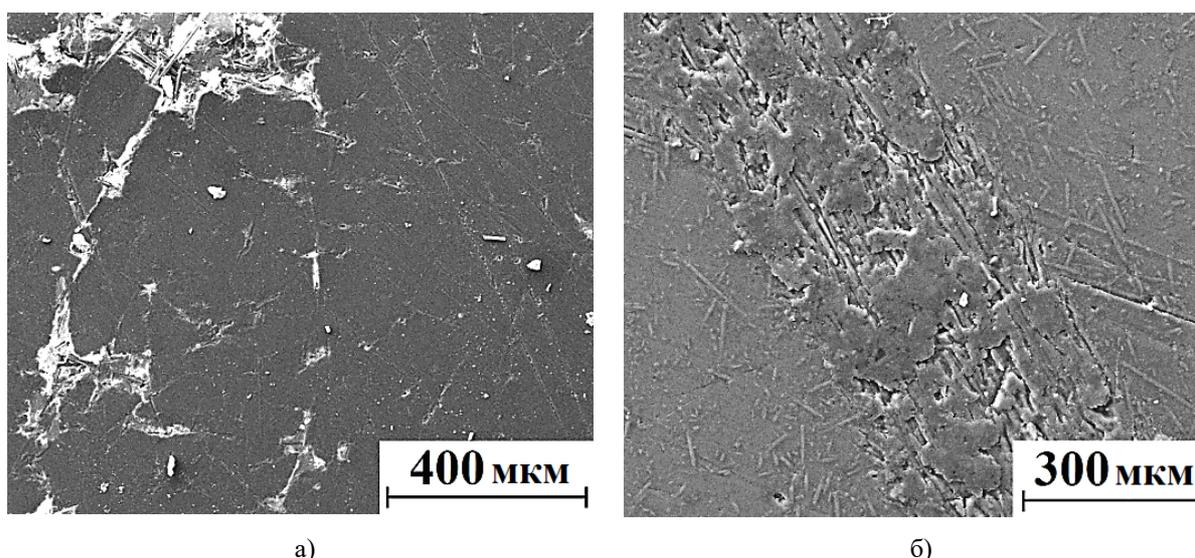
**Таблица 2.** Коэффициент трения и объемный износ композитов на основе ПЭИ (схема «шар-по-дису»), режим P=5 Н, V=0,3 м/с

**Table 2.** Coefficient of friction and volumetric wear of composites based on PEI («ball-on-disk» scheme, P=5 N, V=0.3 m/s)

| № | Состав, вес. %  | Износ I, ( $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /Н·м) | Коэффициент трения $f$ |
|---|-----------------|--|------------------------|
| 1 | ПЭИ             | 390,21±20,51                               | 0,297±0,026            |
| 2 | ПЭИ/10УВ        | 30,39±2,68                                 | 0,286±0,018            |
| 3 | ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ | 0,45±0,04                                  | 0,045±0,005            |
| 4 | РЭИ/10УВ/10С    | 14,7±1,35                                  | 0,228±0,016            |

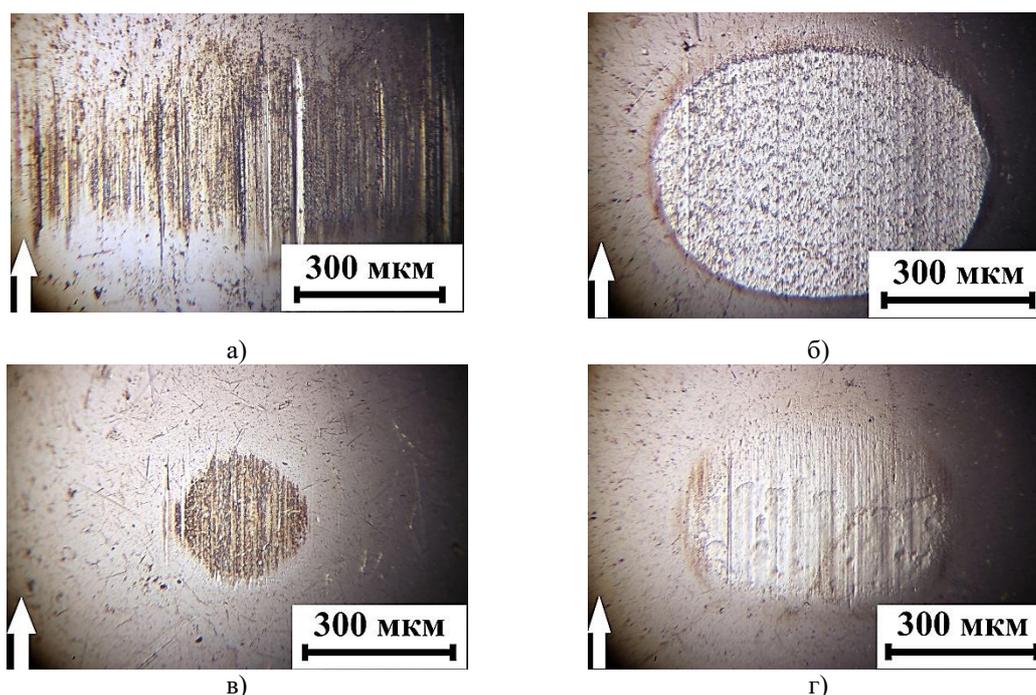
На рис.2 приведены поверхности изнашивания трехкомпонентных ПЭИ-композитов с ПТФЭ и С. Видно, что поверхность изнашивания композита ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ достаточно гладкая со следами ПТФЭ-пленки, о чем свидетельствуют данные EDS-анализа [10]. В композите ПЭИ/10УВ/10С наблюдается четко сформированный трибослой с высоким содержанием С, а также Fe и S [10]. На рис.3 приведены

оптические фотографии контртел после трибоиспытаний исходного ПЭИ и композитов на его основе, из которых видно, что пленка переноса на контртеле формируется в композите, наполненном ПТФЭ (рис.3в). После испытаний композита ПЭИ/10УВ/10С на контртеле фиксируется существенный (абразивный) износ (рис.3г).



**Рис.2.** РЭМ-микрофотографии поверхностей износа при трении по ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ (а), ПЭИ/10УВ/10С (б), схема «шар-по-дису»

**Fig.2.** SEM micrographs of wear surfaces during friction on PEI/10CF/10PTFE (a), PEI/10CF/10S (b), «ball-on-disk» scheme



**Рис.3.** Оптические микрофотографии поверхностей контртел после испытаний ПЭИ (а) и композитов ПЭИ/10УВ (б), ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ (в), ПЭИ/10УВ/10С (г), схема «шар-по-диск»

**Fig.3.** Optical micrographs of counterbody surfaces after testing PEI (a) and composites PEI/10CF (b), PEI/10CF/10PTFE (c), PEI/10CF/10C (d), «ball-on-disk» scheme

Таким образом, топография поверхностей дорожек трения и контртел тройных композитов на основе ПЭИ свидетельствует о преимущественном влиянии формирования переносной пленки на сопрягаемых поверхностях скольжения. В трехкомпонентном ПЭИ-композите с частицами ПТФЭ такая антифрикционная пленка формируется. В случае наполнения частицами графита последние выступают в роли дисперсных упрочняющих включений, для которых уровень прикладываемой нагрузки при точечном трибонагружении («шар-диск») недостаточен для отслоения в виде чешуек, по-

добно классическим твердосмазочным материалам.

В таблице 3 приведены коэффициенты трения и интенсивности изнашивания этих же исследованных композитов в условиях металло-полимерных трибосопряжений по схеме испытаний «вал-колодка». Из таблицы следует, что при данной схеме трибонагружения наблюдается иная картина влияния твердосмазочных наполнителей на формирование трибологических характеристик тройных композитов на основе ПЭИ.

**Таблица 3.** Коэффициент трения и объемный износ ПЭИ и композитов на его основе (схема «вал-колодка», режим  $P=60$  Н,  $V=0,1$  м/с)

**Table 3.** Coefficient of friction and volumetric wear of PEI and PEI-based composites («block-on-ring» scheme, mode  $P=60$  N,  $V=0.1$  m/s)

| № | Состав, вес. %  | Износ $I$ , ( $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /Н·м) | Коэффициент трения $f$ |
|---|-----------------|---|------------------------|
| 1 | ПЭИ             | $32,59 \pm 0,74$                              | $0,467 \pm 0,071$      |
| 2 | ПЭИ/10УВ        | $1,48 \pm 0,27$                               | $0,172 \pm 0,028$      |
| 3 | ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ | $27,19 \pm 0,2$                               | $0,315 \pm 0,030$      |
| 4 | ПЭИ/10УВ/10С    | $2,25 \pm 0,09$                               | $0,158 \pm 0,017$      |

Во-первых, самый низкий износ и коэффициент трения наблюдается в трехкомпонентном композите с графитом, причем его трибологи-

ческие характеристики близки таковым в бинарном (армированном) ПЭИ/10УВ.

Во-вторых, ПТФЭ не выполняет роль твердой смазки при линейном трибоконтакте («вал-колодка»). Наблюдается высокий износ ( $I = 27,19 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ) и коэффициент трения (0,315), практически приближающийся по уровню к таковому для ненаполненного ПЭИ.

На рис.4 приведены топографии поверхностей изнашивания бинарного ПЭИ/10УВ и тройного ПЭИ/10УВ/10С композитов, свидетельствующие о формировании трибослоя на поверхности сопряжения при линейном трибоконтакте. Это подтверждают и данные проведенного EDS-анализа трибослоя [10].

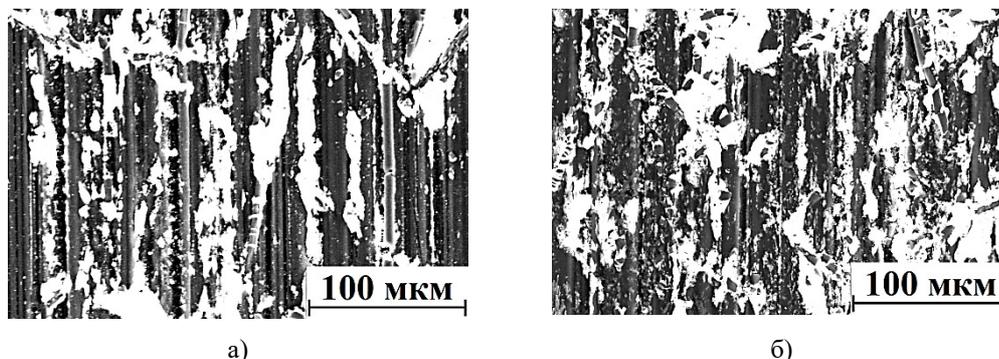


Рис.4. РЭМ-микрофотографии поверхностей износа при трении по ПЭИ/10УВ (а), ПЭИ/10УВ/10С (б), схема «вал-колодка»

Fig.4. SEM micrographs of wear surfaces during friction according to PEI/10CF (a), PEI/10CF/10C (b), «block-on-ring» scheme

При этом на поверхности контртела однородная пленка переноса не формируется (не закрепляется), о чем свидетельствует рис.5. Роль пленки переноса на контртеле нивелируется, что связано с меньшим удельным давлением и невысокой температурой в трибоконтакте при линейном нагружении. Влияние модифицирующего твердосмазочного наполнителя С на сопротивление изнашиванию трехкомпонентных композитов на основе термопластичного ПЭИ эффективно проявляется в формировании трибослоя на поверхности изнашивания образцов при линейном нагружении («вал-колодка»).

На рис.6 приведена сравнительная диаграмма трибологических характеристик исход-

ного полимера ПЭИ и композитов на его основе при двух схемах трибоиспытаний. Видно, что твердосмазочные наполнители не выполняют роль твердой смазки, а скорее играют роль модификатора трибослоя (трибологические характеристики бинарного композита близки по величине таковым тройного композита ПЭИ/10УВ/10С). Формирование необходимого антифрикционного трибослоя на поверхности сопрягаемых композитов на основе ПЭИ будет определяться свойствами модификатора и заданными условиями эксплуатации (нагрузка, температура, тип сопряжения).

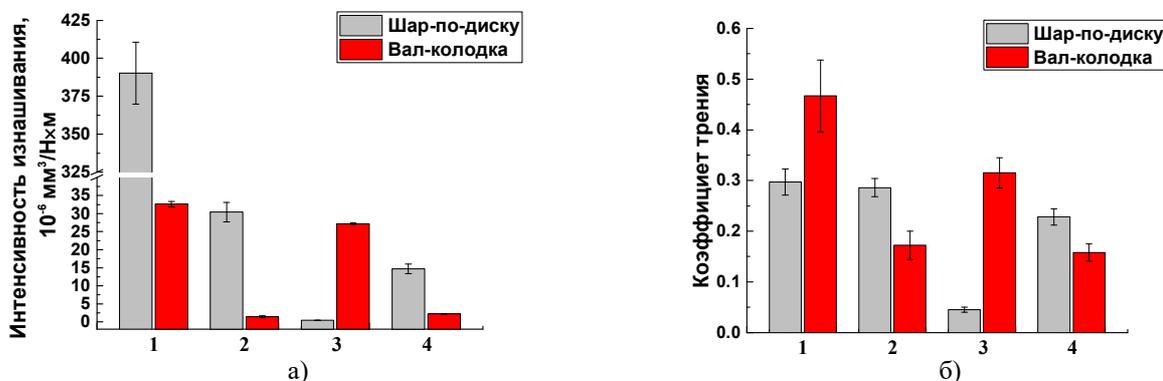


Рис.6. Объемный износ (а) и коэффициент трения (б) ПЭИ (1) и композитов: ПЭИ/10УВ (2), ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ (3), ПЭИ/10УВ/10С (4)

Fig.6. Volumetric wear (a) and coefficient of friction (b) of PEI (1) and composites: PEI/10CF (2), PEI/10CF/10PTFE (3), PEI/10CF/10C (4)

## Выводы

Исследованы структура, механические и трибологические характеристики композитов на основе ПЭИ, армированного длинными углеродными волокнами, и одновременно наполненными твердосмазочными наполнителями различной природы (ПТФЭ, С), в условиях точечного и линейного трибосопряжений. Показано, что введение углеродных волокон (УВ) длиной 2 мм в количестве 10 вес. % увеличивает модуль упругости в 2,0 раза, а предел прочности в 1,2 раза. Однако механические характеристики не связаны прямой зависимостью с трибологическими свойствами антифрикционных композитов на основе ПЭИ (износостойкостью и коэффициентом трения).

Показана определяющая роль схемы и условий трибоиспытаний (точечный контакт, схема «шар-по-дису» и линейный контакт, схема «вал-колодка») на сопротивление изнашиванию трехкомпонентных высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПЭИ. При точечном контакте и низкой шероховатости контртела  $R_a=0.02$  мкм в трехкомпонентных композитах более эффективным твердосмазочным компонентом является ПТФЭ. При линейном контакте и высокой шероховатости контртела  $R_a=0.2$  мкм более эффективными являются частицы графита, поскольку позволяют сформировать стабильный трибослой на поверхности скольжения композитов при металлополимерном трибосопряжении.

Показано, что повышение трибологических свойств трехкомпонентных армированных, антифрикционных композитов на основе ПЭИ в условиях точечного и линейного трибоконтактов обусловлено формированием пленки переноса/трибослоя, защищающих поверхность скольжения полимерного композита от режущего и пропахивающего воздействия неровностей на поверхности металлического контртела. Закономерности формирования последних определяются трибоактивностью модифицирующего (твердосмазочного) наполнителя и условиями трибоагрузки. Условия эксплуатации разрабатываемых высокопрочных антифрикционных композитов определяются различием межслоевых энергий использованных в работе твердосмазочных (слоистых) наполнителей, их эффективностью в формировании пленки переноса/трибослоя композитов на основе ПЭИ и условиями нагружения.

## Список литературы

1. Kumar R., Malaval B., Antonov M., Zhao G. Performance of polyimide and PTFE based composites under sliding, erosive and high stress abrasive conditions // Tribol. Int. 2020. 147. 106282.
2. Lee E., Lee C., Chun Y.S., Han C., Lim D.S. Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites // Composites, Part B. 2017. 116. P. 451–458.
3. Ye J., Burriss D.L., Xie T. A Review of Transfer Films and Their Role in Ultra-Low-Wear Sliding of Polymers // Lubricants. 2016. 4. 4.
4. Gheisari R., Polycarpou A.A. Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions // Wear. 2019. P. 436–437. 203044.
5. Chen B., Li X., Jia Y., Li X., Yang J., Yan F., Li C. MoS<sub>2</sub> nanosheets-decorated carbon fiber hybrid for improving the friction and wear properties of polyimide composite // Composites, Part A. 2018. 109. P. 232–238.
6. Gong H., Yu C., Zhang L., Xie G., Guo D., Luo J. Intelligent lubricating materials: A review // Composites, Part B 2020, 202, 108450.
7. Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology // Wear. 2000. 245. P. 92–99.
8. Gao J. Tribochemical effects in formation of polymer transfer film // Wear. 2000. 245 (1-2). P. 100–106.
9. Panin S.V., Alexenko V.O., Buslovich D.G. High Performance Polymer Composites: A Role of Transfer Films in Ensuring Tribological Properties – A Review // Polymers. 2022. 14. 975.
10. Panin S.V., Luo J., Buslovich D.G., Alexenko V.O., Berto F., Kornienko L.A. Effect of Transfer Film on Tribological Properties of Anti-Friction PEI- and PI-Based Composites at Elevated Temperatures // Polymers. 2022. 14. 1215.

## Информация об авторах

*С. В. Панин – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН; профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых произ-*

водственных технологий Томского политехнического университета.

Д. Г. Буслович – младший научный сотрудник лаборатории нанобиоинженерии Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

Ц. Ло – аспирант отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета.

Л. А. Корниенко – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

В. О. Алексенко – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории механики полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

## References

1. Kumar, R., Malaval, B., Antonov, M. & Zhao, G. (2020). Performance of polyimide and PTFE based composites under sliding, erosive and high stress abrasive conditions. *Tribol. Int.*, 147, 106282.
2. Lee, E., Lee, C., Chun, Y. S., Han, C. & Lim, D. S. (2017). Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites. *Composites, Part B*, 116, 451–458.
3. Ye, J., Burris, D. L. & Xie, T. (2016). A Review of Transfer Films and Their Role in Ultra-Low-Wear Sliding of Polymers. *Lubricants*, 4, 4.
4. Gheisari, R. & Polycarpou, A. A. (2019). Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions. *Wear*, 436-437, 203044.
5. Chen, B., Li, X., Jia, Y., Li, X., Yang, J., Yan, F. & Li, C. (2018). MoS<sub>2</sub> nanosheets-decorated carbon fiber hybrid for improving the friction and wear properties of polyimide composite. *Composites, Part A*, 109, 232–238.

6. Gong, H., Yu, C., Zhang, L., Xie, G., Guo, D. & Luo, J. (2020). Intelligent lubricating materials: A review. *Composites, Part B*, 202, 108450.

7. Bahadur, S. (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245, 92–99.

8. Gao, J. (2000). Tribochemical effects in formation of polymer transfer film. *Wear*, 245(1–2), 100–106.

9. Panin, S. V., Alexenko, V. O. & Buslovich, D. G. (2022). High Performance Polymer Composites: A Role of Transfer Films in Ensuring Tribological Properties – A Review. *Polymers*, 14, 975.

10. Panin, S. V., Luo, J., Buslovich, D. G., Alexenko, V. O., Berto, F. & Kornienko, L. A. (2022). Effect of Transfer Film on Tribological Properties of Anti-Friction PEI- and PI-Based Composites at Elevated Temperatures. *Polymers*, 14, 1215.

## Information about the authors

S. V. Panin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Mechanics of Polymer Composite Materials of the Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS; Professor of the Department of Materials Science of the Engineering School of New Production Technologies of Tomsk Polytechnic University.

D. G. Busslovich – Junior Researcher at the Laboratory of Nanobioengineering of the Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS.

J. Luo – Post-Graduate student of the Department of Materials Science of the Engineering School of New Production Technologies of the Tomsk Polytechnic University.

L. A. Kornienko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Mechanics of Polymer Composite Materials of the Institute of Physics of Strength and Materials Science of the SB RAS.

V. O. Alexenko – Junior Researcher at the Laboratory of Mechanics of Polymer Composite Materials of the Institute of Physics of Strength and Materials Science of the SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.06.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 18.07.2022.

The article was received by the editorial board on 27 June 22; approved after reviewing on 11 July 22; accepted for publication on 18 July 22.