

Т 60 (9)	ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. Серия «ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»	2017
V 60 (9)	IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENIY KHIMIYA KHIMICHESKAYA TEKHOLOGIYA RUSSIAN JOURNAL OF CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY	2017

DOI: 10.6060/tcct.2017609.7y

УДК: 678.073:661.481

**ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН/НАНОТРУБОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ СВМПЭ И ПЭЭК**

**С.В. Панин, Л.А. Корниенко, В.О. Алексенко, Нгуен Дык Ань, Л.Р. Иванова**

Сергей Викторович Панин \*, Владислав Олегович Алексенко

Лаборатория механики полимерных композиционных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, просп. Академический, 2/4, Томск, Российская Федерация, 634055

Кафедра материаловедения в машиностроении, Институт физики высоких технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, просп. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: svp@ispms.tsc.ru\*, vl.aleksenko@mail.ru

Людмила Александровна Корниенко, Лариса Рюриковна Иванова

Лаборатория «механики полимерных композиционных материалов», Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, просп. Академический, 2/4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: rosmc@ispms.tsc.ru, lir1952@mail.ru

Нгуен Дык Ань

Кафедра материаловедения в машиностроении, Институт физики высоких технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, просп. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: nda.ttndvn@gmail.com

*Твердая смазка может быть эффективна при экстремальных условиях эксплуатации, когда жидкие либо пастообразные смазки не выдерживают жестких условий нагружения. Использование твердосмазочных наполнителей позволяет повысить износостойкость композитов с незначительным изменением механических свойств. Для сравнительной оценки вклада нановолокон/нанотрубок углерода в композитах на основе двух различных по природе (структуре) термопластичных матриц (сверхвысокомолекулярный полиэтилен и полиэфирэфиркетон) исследованы механические и триботехнические характеристики смесей на основе СВМПЭ и ПЭЭК в условиях сухого трения скольжения. Показано, что механические характеристики композитов различным образом изменяются при наполнении разнородных по структуре матриц нановолокнами и нанотрубками; износостойкость же полимерных композиций СВМПЭ+1 вес. % УНВ и композиций ПЭЭК+1 вес. % УНВ возрастает в 2 раза в условиях сухого трения скольжения. Более высокое содержание нанонаполнителя затрудняет его равномерное распределение в матрице (агломерации) и приводит, как следствие, к повышению износа в сравнении с исходной матрицей. Исследования надмолекулярной структуры полимеров и нанокomпозиций на их основе показали различие в надмолекулярной структуре сверхвысокомолекулярной матрицы СВМПЭ и ароматического полукристаллического ПЭЭК. Показано, что надмолекулярная структура играет второстепенную роль в формировании износостойкости нанокomпозитов, что косвенно указывает на твердосмазочную роль нанонаполнителей. Нановолокна и нанотрубки в равной степени повышают сопротивление изнашиванию*

*композиций на различных матрицах. Проведен сравнительный анализ роли нановолокон/нанотрубок углерода в изменении механических и триботехнических свойств полимерных композиций на основе СВМПЭ и ПЭЭК.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэфирэфиркетон, наполнитель, углеродные нановолокна и нанотрубки, износостойкость, надмолекулярная структура

**INFLUENCE OF NANOFIBERS/NANOTUBES ON PHYSICAL-MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES BASED ON THERMOPLASTIC UHMWPE AND PEEK MATRIXES**

**S.V. Panin, L.A. Kornienko, V.O. Alexenko, Nguyen Duc Anh, L.R. Ivanova**

Sergei V. Panin\*, Vladislav O. Alexenko

Laboratory of Polymer Composite Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Akademicheskii pr, 2/4, Tomsk, 634055, Russia

Department of Material Science in Mechanical Engineering, Institute of High Technology Physics, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: svp@ispms.tsc.ru\*, vl.aleksenko@mail.ru

Lyudmila A. Kornienko, Larisa R. Ivanova

Laboratory of Polymer Composite Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Akademicheskii pr, 2/4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: rosmc@ispms.tsc.ru, lir1952@mail.ru

Nguyen Duc Anh

Department of Material Science in Mechanical Engineering, Institute of High Technology Physics, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: nda.ttndvn@gmail.com

*Solid lubricants can be effective under extreme operating conditions when liquid or pasty greases fail to withstand severe loading conditions. The use of solid lubricant fillers makes it possible to increase wear resistance of composites with a slight change (decrease) in mechanical properties. To evaluate the contribution of carbon nanofibers/nanotubes in composites based on two different by nature (structure) thermoplastic matrixes (ultrahigh molecular weight polyethylene and polyetheretherketone) mechanical and tribotechnical characteristics of mixtures based on them under dry sliding friction were investigated. It is shown that mechanical characteristics of the composites vary in different ways when the nanofibers and nanotubes are loaded into the different matrixes. The wear resistance of the polymer composites “UHMWPE + 1 wt. % CNF” and “PEEK + 1 wt. % CNF” increases by a factor of two under dry sliding friction. A higher content of the nanofiller hinders its uniform distribution in the matrix (due to agglomeration) and, as a consequence, leads to an increase in wear intensity as compared with the neat matrix. Investigations of the supramolecular structure of the polymers and nanocomposites on their basis have shown a difference in the supramolecular structure of the ultra-high-molecular matrix of UHMWPE and aromatic semicrystalline PEEK. It was revealed that supramolecular structure plays a secondary role in providing wear resistance of the nanocomposites which indirectly indicates the solid lubricating role of the nanofillers. Nanofibers and nanotubes in an equal way increase wear resistance of the composites based on various matrixes. A comparative analysis of the role of carbon nanofibers/nanotubes in the change in mechanical and tribotechnical properties of the polymer composites of UHMWPE and PEEK was carried out.*

**Key words:** ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polyetheretherketone (PEEK), filler, carbon nanofibers, carbon nanotubes, wear resistance, supramolecular structure

**Для цитирования:**

Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Нгуен Дык Ань, Иванова Л.Р. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формировании физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 45-51

**For citation:**

Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Nguyen Duc Anh, Ivanova L.R. Influence of nanofibers/nanotubes on physical-mechanical and tribotechnical properties of polymer composites based on thermoplastic UHMWPE and PEEK matrixes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 9. P. 45-51

## ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает приемлемыми характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью, высокой ударной вязкостью, что обеспечивает возможность его широкого применения в различных областях техники в экстремальных условиях эксплуатации и медицине. Композиционные материалы на основе СВМПЭ позволяют существенно повысить износостойкость изделий в узлах трения [1-3].

Высокотехнологичный конструкционный пластик полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) отличается исключительным и сбалансированным сочетанием механических, физических и химических свойств, что определяет его нарастающую популярность в авиационно-космической технике и имплантологии [4]. Однако, являясь высокопрочным и термостойким в широком интервале температур (-65 °С до +260 °С), ПЭЭК обладает низкой износостойкостью. В последнее время разрабатываются композиты на основе полиэфирэфиркетона. Тип и размер наполнителей определяются областью применения и средой использования композиций [5-7].

Для «металл-полимерных» трибосопряжений углеродные нановолокна и нанотрубки, помимо ключевой функции повышения механических свойств полимерного композита, могут также выступать в качестве твердой смазки при недостатке либо в отсутствие смазочной среды [8]. Отметим, что твердая смазка может быть эффективна при очень низких температурах (например, криогенные температуры), когда жидкие либо пастообразные смазки не выдерживают экстремальных условий эксплуатации.

С целью применения нанонаполнителя в роли упрочняющей (армирующей) «фазы» и твердой смазки исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ с углеродными нанотрубками и нановолокнами в условиях сухого трения скольже-

ния. Выбор различных по природе (структуре) полимеров обусловлен, с одной стороны, определением роли нанонаполнителей (нанотрубок/нановолокон) на формирование надмолекулярной структуры и, как следствие, механических и триботехнических свойств нанокompозитов. С другой стороны, расширением номенклатуры высокопрочных и антифрикционных композитов для широкого спектра условий эксплуатации изделий (температура, нагрузка, скорость, агрессивная среда и т.д.). Проведен сравнительный анализ эффективности углеродных нанотрубок и нановолокон в формировании механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе двух различных термопластических матриц.

## МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовали порошок СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн и размером частиц 5-15 мкм, порошок ПЭЭК фирмы Victrex (PEEK 450G), углеродные нановолокна «Таунит» (Ø 60 нм) и углеродные нанотрубки Tuball (Ø 2 нм). Композиты на основе СВМПЭ получали горячим прессованием при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 5 °С/мин. Композиты на основе ПЭЭК спекали при T = 380 °С из холоднопрессованных заготовок с последующим охлаждением под давлением.

Перемешивание порошков полимерных связующих СВМПЭ, ПЭЭК и наполнителей проводили в планетарной шаровой мельнице MP/0,5\*4 с предварительным диспергированием взвеси компонентов в этиловом спирте в ультразвуковой ванне.

Механические характеристики определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки при количестве образцов одного типа не менее 5 (ГОСТ 11262-80).

Износостойкость образцов в режиме сухого трения определяли по схеме «вал-колодка» при нагрузках на образец 60 Н и скорости скольжения

0,3 м/с на машине трения СМТ-1 в соответствии с ASTM G99/DIN 50324. Размер образцов равнялся 15,8×6,4×10,0 мм<sup>3</sup>. Диаметр контртела, выполненного из стали ШХ15, составлял 35 мм; шероховатость контртела 0,25 мкм. Величину износа определяли по глубине дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor).

Степень кристалличности оценивали на совмещенном анализаторе SDT Q600. ИК спектры получали на спектрометре NIKOLET 5700. Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлены механические характеристики композитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ, наполненных 1 вес.% углеродных нанотрубок и нановолокон.

Таблица 1

Механические свойства композитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ с углеродными нанотрубками (УНТ) и нановолокнами (УНВ)

Table 1. Mechanical properties of UHMWPE and PEEK based composites loaded with carbon nanofibers (CNF) and carbon nanotubes (CNT)

Содержание наполнителя, вес.%	Твердость по Шору D	Модуль упругости E, МПа	Предел прочности σ <sub>B</sub> , МПа	Удлинение до разруш. ε, %	Кристалличность χ <sub>c</sub> , %
ПЭЭК	78,3	2690	109	23	38,7
1В	80,2	-	-	-	33,2
1Т	79,5	2447	96,2	5,6	39,3
СВМПЭ	57,7	405	36	482	56,6
1В	57,9	410	30	368	42,2
1Т	59,2	532	37,8	417	-

Из таблицы следует, что механические свойства СВМПЭ и ПЭЭК (твердость, модуль упругости, предел прочности) незначительно изменяются при наполнении нановолокнами и нанотрубками различных по природе матриц. При наполнении ПЭЭК модуль упругости, предел прочности, удлинение до разрушения уменьшаются. В то же время при наполнении СВМПЭ нанотрубками модуль упругости и предел прочности возрастают, хотя и незначительно. При этом кристалличность композиций несколько уменьшается при наполнении обеих матриц нановолокнами и нанотрубками.

Различное влияния нанонаполнителей (нановолокон/нанотрубок) на механические свойства, наиболее вероятно, связано с характером формирующейся в процессе кристаллизации наполненных полимеров надмолекулярной структуры (тип структуры, кристалличность, размеры кристаллитов, однородность).

Исследования надмолекулярной структуры полимеров и наноконпозиций на их основе показали различие в надмолекулярной структуре сверхвысокомолекулярной матрицы СВМПЭ и ароматического полукристаллического ПЭЭК. В СВМПЭ и наноконPOSITE на его основе с углеродными нановолокнами/нанотрубками формируется сферолитная надмолекулярная структура с кристалличностью 48,6% (рис. 1 а-в).

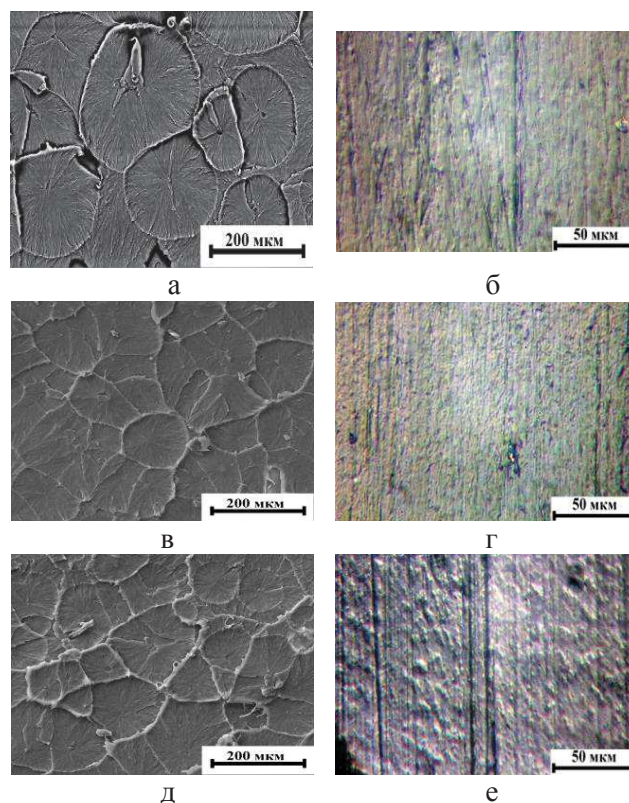


Рис. 1. Надмолекулярная структура и микрофотографии поверхностей износа СВМПЭ (а, г), СВМПЭ + 1 вес. % УНВ (б, д), СВМПЭ + 1 вес. % УНТ (в, е)

Fig. 1. Supramolecular structure and optical micrographs of friction surface of UHMWPE based composites (a, г), UHMWPE + 1 wt. % CNF (б, д), UHMWPE + 1 wt. % CNT (в, е)

Размеры сферолитов уменьшаются при наполнении СВМПЭ нановолокнами и нанотрубками и составляют соответственно 150, 120 и 80 мкм. В образцах ПЭЭК формируется фрагментарная надмолекулярная структура с кристалличностью 38,5%, размеры фрагментов которой меняются при

наполнении матрицы нановолокнами и нанотрубками и составляют соответственно (100×27 мкм), (80×17 мкм) и (78×21 мкм) (рис. 2 а-в).

Из рис. 2 видно, что при введении нанотрубок структура композита становится неоднородной и более рыхлой. Это в меньшей степени наблюдается при введении УНВ, хотя и там структура отличается от исходной: структурные фрагменты становятся более мелкими и разделены пустотами.

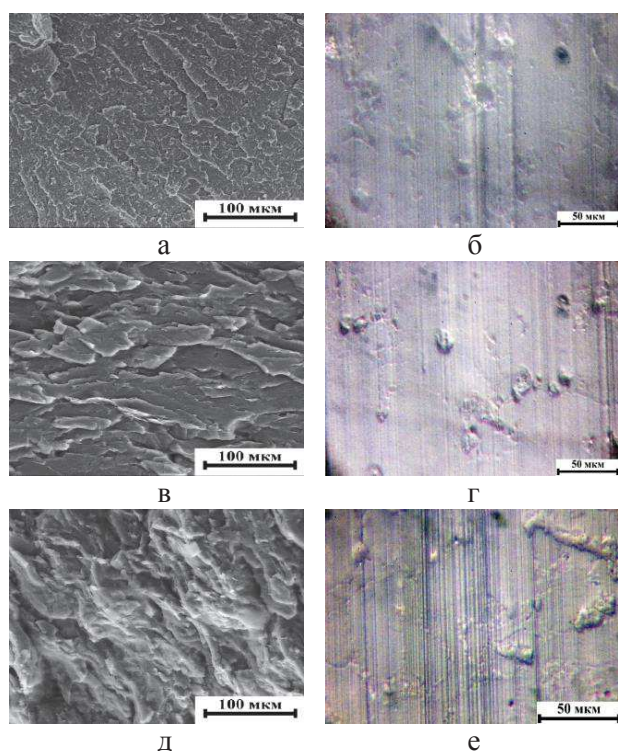


Рис. 2. Надмолекулярная структура и микрофотографии поверхностей износа ПЭЭК (а, г), ПЭЭК + 1 вес. % УНВ (б, д), ПЭЭК + 1 вес. % УНТ (в, е)

Fig. 2. Supramolecular structure and optical micrographs of friction surface of PEEK based composites (a, g), PEEK + 1 wt. % CNF (б, д), PEEK + 1 wt. % CNT (в, е)

Результаты исследований молекулярной структуры нанокompозитов на основе матриц СВМПЭ и ПЭЭК методом ИК-спектроскопии представлены на рис. 3 и 4, из которых следует, что наблюдается небольшое увеличение интенсивности пиков C=O (1850-1700 см<sup>-1</sup>), C-O (1200 и 802 см<sup>-1</sup>) в СВМПЭ, а также C=C (1276 и 1659 см<sup>-1</sup>), C=O (864 и 1604 см<sup>-1</sup>), C-O-C (1096 см<sup>-1</sup>) в ПЭЭК. Это свидетельствует о появлении в нанокompозитах дополнительных химических связей.

Таким образом, введение нановолокон/нанотрубок в различные по структуре термопластичные матрицы в объеме до 1 вес.% в качестве армирующих включений не обеспечивают существенных изменений механических характеристик композиций.

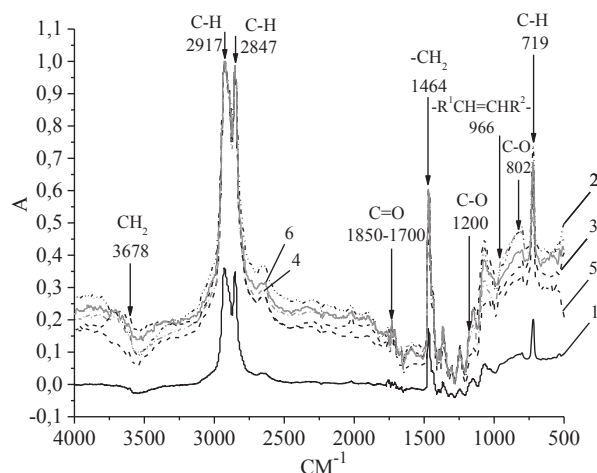


Рис. 3. ИК спектры СВМПЭ (1) и нанокompозитов на его основе с содержанием УНВ 0,01(2), 0,065 (3), 0,1(4), 0,5(5) и 1 (6) вес. %

Fig. 3. IR-spectra of UHMWPE (1) and its nanocomposites with CNF loading of 0.01(2), 0.065 (3), 0.1(4), 0.5(5) and 1 (6) wt. %

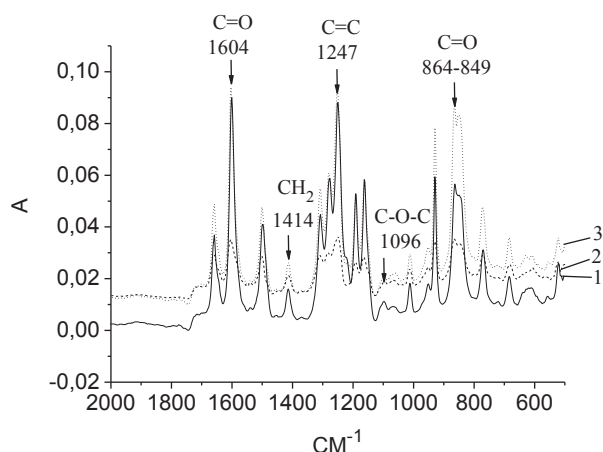


Рис. 4. ИК спектры нанокompозитов на основе ПЭЭК (1), ПЭЭК + 1 вес. % УНТ (2), ПЭЭК + 1 вес. % УНВ (3)  
Fig. 4. IR-spectra of PEEK (1) and its nanocomposites "PEEK + 1 wt. % CNT" (2), "PEEK + 1 wt. % CNF" (3)

В работе проведены триботехнические испытания нанокompозитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ. Рис. 5 иллюстрирует данные трибоиспытаний композитов на основе ПЭЭК с углеродными нанотрубками и нановолокнами с содержанием 1 вес.%. Из рис. 5 следует, что, во-первых, введение нанонаполнителя в указанных количествах позволяет снизить объемный износ ПЭЭК примерно в 2 раза. Во-вторых, нановолокна и нанотрубки в равной мере вносят вклад в износостойкость композитов на основе матрицы ПЭЭК. Это подтверждают и микрофотографии поверхностей изнашивания нанокompозитов «ПЭЭК+1 вес. %УНВ» и «ПЭЭК+1 вес. %УНТ» (рис. 2 г-е). При этом следует указать, что двукратное увеличение износостойкости нанокompозитов на основе ПЭЭК в условиях сухого трения скольжения наблюдается

при умеренной скорости скольжения (0,3 м/с) и нагрузке 30 Н. Температура поверхностей изнашивания у них также примерно одинакова и составляет 27 °С.

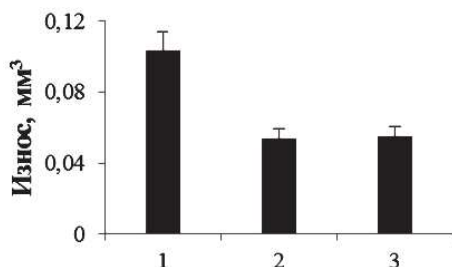


Рис. 5. Объемный износ ( $\text{mm}^3$ ) ПЭЭК (1) и композитов на его основе с 1 вес. % УНВ (2), 1 вес. % УНТ (3) при нагрузке 30 Н и скорости 0,3 м/с. Путь 1080 м

Fig. 5. Volume wear ( $\text{mm}^3$ ) of PEEK (1) its composites with 1 wt. %CNF (2), 1 wt. % CNT (3); Applied load: 30 N and sliding velocity of 0.3 m/s. Friction distance is 1080 m

На рис. 6 приведены результаты исследования изнашивания СВМПЭ и нанокompозиций на его основе. Из рис. 6 следует, что износостойкость СВМПЭ возрастает также в два раза при наполнении его нановолокнами/нанотрубками. При этом вклад от нанотрубок и нановолокон в износостойкость композиций на основе СВМПЭ одинаков. В отличие от нанокompозитов на основе ПЭЭК, двукратного увеличения износостойкости нанокompозиты на основе СВМПЭ достигают в условиях величины приложенной нагрузки 60 Н и скорости скольжения 0,3 м/с (рис. 1 и табл. 1).

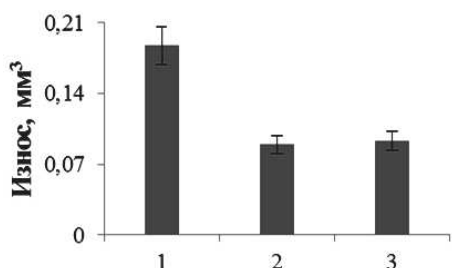


Рис. 6. Объемный износ ( $\text{mm}^3$ ) СВМПЭ (1) и композитов на его основе с 1 вес.% УНВ (2), 1 вес.% УНТ (3) при нагрузке 60 Н и скорости 0,3 м/с. Путь 3240 м

Fig. 6. Volume wear ( $\text{mm}^3$ ) of UHMWPE (1) and its composites with 1 wt. %CNF (2), 1 wt. % CNT (3); applied load: 60 N and sliding velocity of 0.3 m/s. Friction distance is 3240 m

Для иллюстрации идентичности вклада углеродных нановолокон/нанотрубок в износостойкость композитов на различных полимерных матрицах на рис. 7 приведены данные о скорости (интенсивность) износа на стадии установившегося изнашивания для нанокompозитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ.

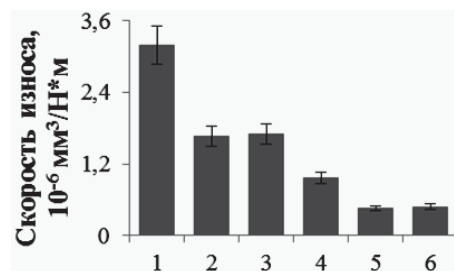


Рис. 7. Скорость износа ( $10^{-6} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) ПЭЭК (1), «ПЭЭК + 1 вес. % УНВ» (2), «ПЭЭК + 1 вес. % УНТ» (3), СВМПЭ (4), «СВМПЭ + 1 вес. % УНВ» (5), «СВМПЭ + 1 вес. % УНТ» (6) на стадии установившегося изнашивания при сухом трении скольжения

Fig. 7. Wear rate ( $10^{-6} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) for the composites: PEEK (1), «PEEK + 1 wt. % CNF» (2), «PEEK + 1 wt. % CNT» (3), UHMWPE (4), «UHMWPE + 1 wt. % CNF» (5), «UHMWPE + 1 wt. % CNT» (6) at steady state of wear under dry sliding friction

По мнению авторов, нановолокна (нанотрубки), «осциллируя» в поверхностном деструктурированном слое матрицы, могут обеспечить поглощение подводимой упругой энергии, выступая в качестве своеобразной твердосмазочной среды для «металл-полимерного» трибосопряжения и, тем самым, снизить интенсивность изнашивания деталей при сухом трении скольжения [3].

Сравнительный анализ роли углеродных нанотрубок и нановолокон в обеспечении износостойкости композитов на основе ПЭЭК и СВМПЭ в условиях сухого трения скольжения, в том числе по данным проведенных нами ранее исследований, [3, 8] показал, что УНВ/УНТ эффективны при содержании не более 1 вес. %. Более высокое содержание нанонаполнителя затрудняет его равномерное распределение в матрице (агломерации) и приводит, как следствие, к повышению износа в сравнении с исходной матрицей. Для исследованных нанокompозиций (1 вес. % нановолокон/нанотрубок) на различных матрицах СВМПЭ и ПЭЭК надмолекулярная структура играет второстепенную роль в формировании износостойкости нанокompозитов, что косвенно указывает на твердосмазочную роль нанонаполнителей.

## ВЫВОДЫ

Углеродные нановолокна и нанотрубки в равной степени выполняют роль твердосмазочной среды в трибосопряжении композитов на различных по природе термопластических матрицах (сверхвысокомолекулярной, высокопрочной) и обеспечивают повышение вдвое износостойкости таких нанокompозитов в требуемых условиях эксплуатации (низкие и повышенные температуры, агрессивные среды, высокие и средние нагрузки).

Нанокompозиты с углеродными нановолокнами/нанотрубками на основе СВМПЭ обеспечивают наилучшие трибомеханические характеристики при умеренных скоростях (0,3 м/с) и нагрузках до 60 Н.

Нанокompозиты с углеродными нановолокнами/нанотрубками на основе ПЭЭК могут быть эффективно использованы в трибоузлах при умеренных скоростях скольжения и невысоких нагрузках (не выше 30 Н).

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013-2020 гг, а также проекта РФФИ 16-48-700192\_р\_а «Научные основы создания многоуровневых твердосмазочных, экстудированных, антифрикционных композитов на базе перспективных термопластичных полимеров для медицины и машиностроения» с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН и Аналитического центра НИ ТПУ.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Stein H.L.** Engineered Materials Handbook. 1999. V. 2. Engineering Plastics. P. 280.
2. **Люкшин Б.А., Панин С.В.** Компьютерное моделирование и конструирование наполненных композиций. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2015. 263 с.
3. **Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Иванова Л.Р., Шилько С.В.** Сравнение эффективности углеродных нано и микроволокон в формировании физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе высокомолекулярной матрицы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 9. С. 99-105.
4. **Zalaznik M., Kalin M., Novak S., Jakša G.** Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK. *Wear.* 2016. 364. P. 31–39.
5. **Díez-Pascual A.M., Naffakh M., Marco C., Ellis G., Gómez-Fatou M.A.** High-performance nanocomposites based on polyetherketones. *Prog. Mater. Sci.* 2012. V. 57. P. 1106–1190.
6. **Kuo M., Tsai C., Huang J., Chen M.** PEEK composites reinforced by nano-sized SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulates. *Mater. Chem. Phys.* 2005. 90. P. 185–195.
7. **Qiao H.B., Guo Q., Tian A.G., Pan G.L., Xu L.B.** A study on friction and wear characteristics of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.* 2007. 40. P. 105–110.
8. **Lurie S.A., Volkov-Bogorodskiy D.B., Knyzeva A.G., Panin S.V., Kornienko L.A.** Scale effects in tribological properties of solid-lubricating composites made of ultra-high molecular weight polyethylene filled with calcium stearate particles. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 124. P. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012035.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Stein H.L.** Engineered Materials Handbook. 1999. V. 2. Engineering Plastics. P. 280.
2. **Lyukshin B.A., Panin S.V.** Computer simulation and design of filled polymer composites. Novosibirsk: Izd-vo SO RAS (SB RAS Publishing House). 2015. 263 p. (in Russian).
3. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Comparison on efficiency of carbon nano- and microfibers in formation physical-mechanical and tribotechnical properties of polymer composites based on high-moluculat weight matrix. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 9. P. 99-105 (in Russian).
4. **Zalaznik M., Kalin M., Novak S., Jakša G.** Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK. *Wear.* 2016. 364. P. 31–39.
5. **Díez-Pascual A.M., Naffakh M., Marco C., Ellis G., Gómez-Fatou M.A.** High-performance nanocomposites based on polyetherketones. *Prog. Mater. Sci.* 2012. V. 57. P. 1106–1190.
6. **Kuo M., Tsai C., Huang J., Chen M.** PEEK composites reinforced by nano-sized SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulates. *Mater. Chem. Phys.* 2005. 90. P. 185–195.
7. **Qiao H.B., Guo Q., Tian A.G., Pan G.L., Xu L.B.** A study on friction and wear characteristics of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.* 2007. 40. P. 105–110.
8. **Lurie S.A., Volkov-Bogorodskiy D.B., Knyzeva A.G., Panin S.V., Kornienko L.A.** Scale effects in tribological properties of solid-lubricating composites made of ultra-high molecular weight polyethylene filled with calcium stearate particles. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 124. P. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012035.

*Поступила в редакцию 04.07.2017  
Принята к опубликованию 07.09.2017*

*Received 04.07.2017  
Accepted 07.09.2017*