

## Abstract

Using the methods of optical metallography and scanning electron microscopy, a systematic study of the features of destruction of structurally and crystallographically textured titanium blanks after low-cycle tests in synthetic seawater containing 3% NaCl was carried out. It is shown that corrosion-resistant structurally and crystallographically isolated regions with a basic orientation of the interface and a width of 20-30 microns, which periodically lay over the entire thickness of the workpiece in increments of 100-170 microns, are responsible for reducing fatigue life. It is shown that for austenitic steels there is a duality regarding the presence of chlorine in seawater: it reduces the activity of microbiological corrosion, but increases the risk of pitting and crevice corrosion.

*Keywords:* corrosion, seawater, microbiological, pitting, crevice corrosion and corrosion cracking.

УДК 621.01

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-252

Жаров В.Е.<sup>1</sup>, Наумов А.Н.<sup>2</sup>, Е.Б. Седакова<sup>2,3</sup>, Ли Сяньшунь<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, elenasedakova2006@yandex.ru

<sup>3</sup> Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА МЕНЕЕ ИЗНОСОСТОЙКИМ ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ ПО СТАЛИ

### Аннотация

Исследована возможность применения наноразмерных частиц меди в качестве наполнителя для полиэфирэфиркетона (ПЭЭК). На основе физической модели изнашивания проведено исследование возможности разработки триботехнически эффективного композита с наполнителем низкой износостойкости, построены расчетные концентрационные зависимости относительной интенсивности линейного изнашивания композита по отношению к матрице для четырех размеров дисперсного наполнителя из нано и микроразмерного диапазона. В результате определены диапазоны эффективных концентраций наполнителя при введении в ПЭЭК наномеди. Для исследования причин повышения износостойкости нанокompозита при введении дисперсных частиц меди применен метод молекулярной динамики. Получено, что в присутствии наполнителя существенно повышается энергия межмолекулярных связей. В результате моделирования трения скольжения молекулярных моделей выявлены различия в плотности молекул в области контакта с контртелом до и после сдвига, а также различия в величинах энергий межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями в зависимости от времени сдвига. Сопоставление данных, полученных в результате моделирования молекулярных структур полимерной

матрицы и композита, с построенными концентрационными зависимостями относительной интенсивности линейного изнашивания композита по отношению к матрице позволяют выявить дополнительную причину повышения износостойкости композита и, в дальнейшем, проводить оценку изменения износостойкости по величине изменения энергии межмолекулярных связей.

*Ключевые слова:* трение скольжения, износостойкость, триботехническая эффективность, физическая модель износа, нагруженность матрицы, полиэфирэфиркетон, нанонаполнитель, молекулярная динамика, энергия межмолекулярного взаимодействия.

## **Введение**

Полимерные композиционные материалы хорошо зарекомендовали себя в качестве конструкционных материалов в различных областях машиностроения, благодаря их сравнительно высоким механическим показателям, химической стойкости и относительной простоте обработки при изготовлении деталей [1-4]. В последнее время значительное развитие получили технологии получения наноразмерных материалов, включая нанокоспозиционные полимерные материалы. В связи с этим представляются актуальными исследования особенностей взаимодействия наноразмерных наполнителей с полимерной матрицей [5]. Одним из востребованных термопластичных полимеров в машиностроении является полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), который обладает сравнительно высокими температурами стеклования и плавления [2, 6-7], а также хорошими механическими и триботехническими свойствами [4]. Известно, что введение наполнителей в полимеры может приводить к изменению их износостойкости. Однако до сих пор недостаточно изучен механизм взаимодействия нанонаполнителей и матрицы, а опубликованные результаты экспериментальных исследований в этой области носят феноменологический характер. Результаты экспериментальных исследований показывают, что для получения положительного триботехнического эффекта следует тщательно подбирать концентрацию наполнителя, его размеры и материал. Так в [8] рассматривается технология получения наночастиц меди, а также отмечается возможность их применения в качестве наполнителя. В работе [9] приведены результаты исследования влияния наночастиц меди на триботехнические свойства ПЭЭК, высказаны гипотезы, объясняющие повышение износостойкости, связанное с возможностью образования агломератов, действующих по типу роликовых опор для снижения трения, а также формирования каналов отвода тепла из зоны трения. С другой стороны, известно, что по износостойкости медь уступает ПЭЭК.

Целью исследований, результаты которых представлены в данной работе, являлось определение возможности триботехнической эффективности наполнения ПЭЭК наноразмерными частицами меди, а также изучение на молекулярном уровне структурных изменений, происходящих в композитах с нанонаполнителями при трении скольжения по стали.

## **Теоретическая часть**

Для возможности определения оптимального соотношения параметров наполнителя для ПЭЭК-матрицы и оценки триботехнической эффективности наполнения матрицы использовалась физическая модель износа, полученная на основе известной степенной зависимости интенсивности линейного изнашивания от

основных эксплуатационных параметров вида [10]

$$I_h = x p^{b_c} v^g \quad (1)$$

где  $I_h$  – интенсивность линейного изнашивания;  $p$ - контактное давление;  $v$  - скорость скольжения;  $x$ ,  $b_c$  и  $g$  –коэффициенты, определяемые опытным путем.

Следует иметь ввиду, что зависимость (1) в усредненном виде и без учета трибонагрева описывает механическую составляющую износа.

Если износостойкость материала наполнителя намного выше износостойкости полимерной матрицы, то с уменьшением контактного давления в зоне трибоконтакта матрицы ее износ в соответствии с (1) будет снижаться и, таким образом, все большее влияние на износ композита будут оказывать триботехнические свойства материала наполнителя. Это должно приводить к уменьшению износа композита в целом. Представим композиционный материал в виде параллельного соединения двух элементов, один из которых имеет упругие свойства полимера, а другой – наполнителя, взаимодействующего с полимером за счет сил адгезии. Тогда, учитывая распределение внешней нагрузки по долям между областями выхода на контактную поверхность материалов матрицы и наполнителя, выражение (1) для определения интенсивности линейного изнашивания композита в целом принимает вид [11]

$$I_h = I_h^m + I_h^f = x \beta^{b_c} p^{b_c} v^g + y(1 - \beta)^{b_c} p^{b_c} v^g \quad (2)$$

где  $I_h^m$  и  $I_h^f$  - интенсивности изнашивания материалов матрицы и наполнителя соответственно;  $\beta$  - структурный параметр, определяющий долю общей нагрузки, приходящейся на матрицу, или нагруженность матрицы;  $x$ ,  $y$ ,  $b_c$ ,  $g$  – коэффициенты, определяемые опытным путем.

При малых и средних концентрациях наполнителя величины  $b_c$  и  $g$  можно принять равными, как для матрицы, так и для композита. В (2) учтено различие в величинах  $I_h^m$  и  $I_h^f$  посредством введения коэффициентов  $x$  и  $y$ . Таким образом, первое слагаемое в (2) (при  $\beta = 1$ ) определяет интенсивность линейного изнашивания чистого полимера, а второе слагаемое в (2) (при  $\beta = 0$ ) – материала наполнителя [11].

Разделив (2) на интенсивность линейного изнашивания полимера, то есть на величину  $I_h^m$  при  $\beta=1$ , найдем относительную интенсивность линейного изнашивания композита по сравнению с материалом матрицы  $I_C^m$  [11]

$$I_C^m = \beta^{b_c} + \frac{y}{x} (1 - \beta)^{b_c} \quad (2)$$

На основании выше сказанного примем (3) за физическую модель относительного износа композита по отношению к матрице, которая позволяет оценивать триботехническую эффективность наполнения полимерной матрицы, то есть определять изменение величины  $I_h$  композита по сравнению с исходным полимером. Полученное выражение не является аддитивным, так как в нем суммируются степенные зависимости относительно нагруженности матрицы  $\beta$ . В результате сопоставления экспериментальных данных по износостойкости [11] с выводами, приведенными в [10], была определена усредненная величина показателя степени  $b_c$ , равная 2,5.

Расчетное соотношение для определения  $\beta$  композитов со случайным распределением дисперсного наполнителя имеет вид [11]

$$\beta = \frac{(1 - \varphi_f)}{(1 - \varphi_f) + \left(\frac{2}{Q} l_m \Phi + 1\right) \varphi_f} \quad (4)$$

где  $\varphi_f$ – объемная концентрация наполнителя в композите;  $Q$  – коэффициент

усиления композита,  $Q=3/8$ ;  $l_m$  – средняя относительная длина агрегатов частиц наполнителя,  $l_m = \frac{l_s}{r_f}$ ;  $r_f$  – средний размер частицы наполнителя;  $\Phi$  – фактор фрактальности,  $\Phi = \frac{1}{\varepsilon^{(1-D_\Phi)}}$ ;  $\varepsilon$  – масштаб измерений периметра поперечного сечения единичного элемента дисперсного наполнителя,  $\varepsilon = r_{fЭ} / r_f$ ;  $r_{fЭ}$  – эталон измерений,  $r_{fЭ}=10$  нм;  $D_\Phi$  – фрактальная размерность.

$D_\Phi$  для большого числа объектов – площадей, ограниченных замкнутой линией находится в пределах 1,2-1,4 [12], тогда в (14) можно принять  $D_\Phi = 1,3$ . При отсутствии наполнителя ( $\varphi_f = 0$ ) нагруженность матрицы  $\beta = 1$ . Подставляя эту величину в (2) получаем выражение для интенсивности линейного изнашивания полимерной матрицы  $I_h^m$ .

Для оценки эффективности наполнения матрицы используем величину

$$I_C^m = \frac{I_h^C}{I_h^m} \quad (5)$$

Значение  $I_C^m$  дает количественную оценку изменения интенсивности линейного изнашивания композита. Кроме того, величина  $I_C^m$  учитывает тот факт, что износы матриц различных композитов могут отличаться на порядки при одних и тех же типах наполнителей.

На рисунке 1 приведены расчетные концентрационные зависимости  $I_C^m$  для композитов, содержащих частицы наполнителя нано и микро размеров из материала с различной износостойкостью: а) – на порядок превышающей износостойкость матрицы, и б) в два меньшей, чем износостойкость матрицы.

Для углубленного понимания эффекта от наполнения проведено исследование структурных изменений в композите на основе ПЭЭК при введении наноразмерных частиц меди методом молекулярной динамики. Это метод компьютерного моделирования на основе уравнений движения Ньютона, применяемый для определения пространственной траектории движения частиц (молекул, атомов) системы под воздействием внешних условий, а так же для изучения структуры и свойств материалов в макроскопическом состоянии на основе методов статистической механики.

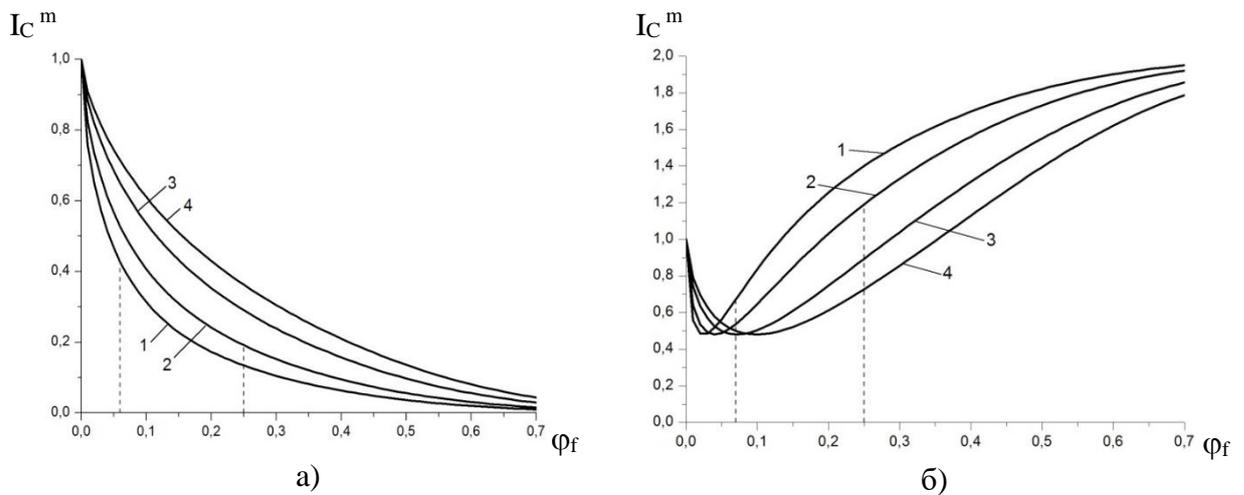


Рисунок 1 – Зависимости  $I_C^m$  от  $\varphi_f$ : а) –  $I_h^C / I_h^m$   $y/x = 0,1$ ; б) –  $y/x = 2$ ; 1 –  $r_f = 20$  нм; 2 –  $r_f = 100$  нм; 3 –  $r_f = 1$  мкм; 4 –  $r_f = 5$  мкм; пунктирные линии соответствуют  $\varphi_f$ , при которых вся матрица переходит в модифицированное (поверхностное) состояние, для  $r_f = 20$  нм и 100 нм, соответственно.

В работах [13-14] этот метод был использован для исследования влияния

наполнителей на механические и триботехнические свойства полимерных материалов. Для учёта энергетических взаимодействий в ПТФЭ и его композите на молекулярном уровне применялось силовое поле COMPASS. Полная потенциальная энергия модели материала в силовом поле COMPASS суммируется следующим образом [15]

$$E = \sum E^{(b)} + \sum E^{(\theta)} + \sum E^{(\varphi)} + \sum E^{(\gamma)} + \sum E^{(bb')} + \sum E^{(b\theta)} + \sum E^{(b\varphi)} + \sum E^{(b'\varphi)} + \sum E^{(\theta\theta')} + \sum E^{(\theta\varphi)} + \sum E^{(\theta\theta'\varphi)} + \sum E^{(vdw)} + \sum E^{(elec)} \quad (5)$$

Слагаемые в (6) можно разделить на две категории, а именно,  $\sum E^{(b)}$ ;  $\sum E^{(\theta)}$ ;  $\sum E^{(\varphi)}$ ;  $\sum E^{(\gamma)}$  - слагаемые, учитывающие вклад в величину полной потенциальной энергии каждой из составляющих;  $\sum E^{(bb')}$ ;  $\sum E^{(b\theta)}$ ;  $\sum E^{(b\varphi)}$ ;  $\sum E^{(b'\varphi)}$ ;  $\sum E^{(\theta\theta')}$ ;  $\sum E^{(\theta\varphi)}$ ;  $\sum E^{(\theta\theta'\varphi)}$  - слагаемые, учитывающие вклад в величину  $E$ , вносимые потенциальными энергиями перекрестных связей между составляющими. Последние два слагаемых в (6) представляют энергию несвязанного потенциала модели. Энергия сил Ван-дер-Ваальса,  $\sum E^{(vdw)}$ , представляется суммой отталкивающих и притягивающих членов Леннарда-Джонса. Потенциал электростатической силы,  $\sum E^{(elec)}$ , представляется суммой энергетических взаимодействий между атомами.

Моделирование трения скольжения проводилось при температуре 298 К посредством сдвига слоя железа относительно молекулярных моделей исследуемых материалов со скоростью 0,5 Å/пс в течение 1000 пс.

При моделировании сдвига принимались следующие допущения: анализировались ансамбли  $NVT$ , где  $N$  — заданное количество атомов в рассматриваемой модели,  $V$  — заданный объём;  $T$  — заданная температура.

### Результаты и их обсуждение

Представленные на рисунке 1 а) концентрационные зависимости  $I_C^m$ , отражают ожидаемый эффект от наполнения матрицы наполнителем, имеющим более высокую износостойкость, причем, как видно из рисунка 1, наноразмерный наполнитель показывает большую эффективность наполнения. На рисунке 1 б). приведены зависимости  $I_C^m$  от  $\varphi_f$  для композита с наполнителем, имеющим меньшую износостойкость по сравнению с матрицей. И в этом случае наблюдается положительный эффект от наполнения, который проявляется в существенно более узком диапазоне величин  $\varphi_f$ . Из рисунка 1 б) следует, что наибольшая эффективность нанонаполнения достигается при  $\varphi_f = 0,07$ , а в случае использования микроразмерного наполнителя при  $\varphi_f = 0,12$ . Следует отметить, что наполнители с низкой износостойкостью в большинстве случаев представляют собой порошки таких материалов, как алюминий, латунь, бронза, медь. Они могут вводиться в полимер для повышения его теплопроводности [16] и, как следствие, для повышения нагрузочной способности композита.

В результате моделирования деформаций растяжения-сжатия построенных кубических молекулярных моделей ПЭЭК и ПЭЭК+наноразмерные частицы меди после релаксационных оптимизаций при изобарно-изотермическом ансамбле, получены матрицы жёсткости, с определением величин модулей сдвига и величин энергий межмолекулярных связей  $U_{inter}^V$  ПЭЭК и его нанокompозита. Расчеты показали незначительное повышение модуля сдвига в модельном нанокompозите с наномедью по сравнению ПЭЭК-матрицей. При этом величина  $U_{inter}^V$  модельного нанокompозита превышает этот параметр для ПЭЭК более, чем в 2 раза. Таким

образом, учитывая, что износостойкость находится в обратной зависимости с величиной  $U^{V_{inter}}$  [17] полученные различия в значениях  $U^{V_{inter}}$  для композита и матрицы подтверждают возможность получения положительного триботехнического эффекта при наполнении сравнительно высокоизносостойкого полимера менее износостойким наполнителем. Для проверки этой гипотезы было проведено моделирование трения скольжения исследуемых материалов посредством сдвига слоя железа относительно ПЭЭК и его нанокompозита. В результате отмечена различная плотность скопления молекул чистого ПЭЭК и его нанокompозита в зоне непосредственного контакта со слоем железа. Так разность между величинами максимальной относительной плотности молекул на поверхности контртела, определенными до и после сдвига в паре с исходным ПЭЭК на 70% выше, чем в паре с модельным композитом ПЭЭК+наномедь. Этот результат находится в соответствии с определенными выше значениями  $U^{V_{inter}}$ .

### **Заключение.**

Расчетным путем с применением физической модели износа показана возможность эффективного наполнения полимерной матрицы существенно менее износостойким наполнителем. На примере введения дисперсных наполнителей с размерами частиц 20 и 100 нм определены их наиболее эффективные объемные концентрации.

Для исследования структурных изменений ПЭЭК и его композита с наноразмерными частицами меди применен метод молекулярной динамики. Получено что в присутствии наномеди повышается величина энергии межмолекулярных связей в объеме композита,  $U^{V_{inter}}$ , по сравнению с ПЭЭК-матрицей.

В результате моделирования трения молекулярных моделей ПЭЭК и его композита с наномедью отмечено снижение на 35 % величины энергии межмолекулярного взаимодействия в зоне контакта с контртелом исследуемого нанокompозита по сравнению с чистым ПЭЭК, что может свидетельствовать совместно с величиной  $U^{V_{inter}}$  о кинетической стабилизации композита в присутствии нанонаполнителя.

### **Благодарности**

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <http://rscf.ru/project/22-19-00178/>»

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Omrani E, Menezes P L, Rohatgi P K. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. // Engineering Science and Technology. -2016. -12(9). -P. 717-736.
2. Микитаев А.К., Саламов А.Х., Беев А.А. и др. Наполнение полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) как способ получения композитов с высокими эксплуатационными свойствами // Пластические массы. -2017. -№ (5-6). -С. 6-9.
3. Мышкин Н.К., Гуцев Д.М., Григорьев Ф.А. Характеристики нанокompозитов на основе ПЭЭК при трении по стали // Трение и износ. -2021. -Т. 42. -№3. -С. 350-357.
4. Панин С.В., Нгуен Дык Ань, Корниенко Л.А. и др. Антифрикционные и механические свойства термопластичных углеродных композитов на основе полиэфирэфиркетона // Трение и износ. -2020. -Т. 41. -№4. -С. 427-435.
5. Ли С., Седакова Е.Б. Молекулярное моделирование кинетики фрикционного

- разрушения полимерных композитов на примере Ф4К20. // Трение и износ. -2022. -Т. 43. -№ 6. -С. 612–620.
6. Choy C L, Kwok K W, Leung W P, et al. Thermal conductivity of poly (ether ether ketone) and its short-fiber composites // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. -1994. - V. 32. -N.8. -P. 1389-1397.
  7. Cheng S Z D, Cao M Y, Wunderlich B. Glass transition and melting behavior of poly (oxy-1, 4-phenyleneoxy-1, 4-phenylenecarbonyl-1, 4-phenylene) (PEEK) // Macromolecules. -1986. - V. 19. -N. 7. -P. 1868-1876.
  8. Song H, Wang Z, Yang J. et al. Facile synthesis of copper/polydopamine functionalized grapheme oxide nanocomposites with enhanced tribological performance // Chemical Engineering Journal. -2017. -V. 324. -P. 51-62.
  9. Fan S., Gao S., Duan C., et al. Facile synthesis of copper nanoparticles and nanowires on polyetheretherketone-matrix nanocomposites: Thermal conductivity, dynamic mechanical properties and wear resistance. // Composite Science and Technology. -2022. -V.219. -P. 109224
  10. Добычин Н.М., Морозов А.В., Никулин А.В., Сачек Б.Я., Анисимов А.В. Планирование эксперимента при исследовании триботехнических характеристик фенольных углепластиков // Вопросы материаловедения. - 2009. -№1. -С.186-193.
  11. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б., Стукач А.В. Исследование особенностей структурной агрегации частиц наполнителя в полимерных термопластичных композитах на основе сравнительного анализа размеров частиц износа// Вопросы материаловедения. -2011. - №. 2. -С. 50-56.
  12. Бахарева В.Е., Рубин М.Б., Лобынцева И.В., Тризно А.В. Применение в народном хозяйстве подшипников скольжения из полимерных композиционных материалов. Л.: ЛДНТП, -1991. -19 с.
  13. Wang B, Zhang K, Zhou C, et al. Engineering the mechanical properties of CNT/PEEK nanocomposites // RSC advances. -2019. -V. 9. -N. 23.- P. 12836-12845.
  14. Pan L, Guo H, Zhong L, et al. Influence of surface-modified glass fibers on interfacial properties of GF/PEEK composites using molecular dynamics // Computational Materials Science. – 2021. -188. -110216.
  15. Sun H, Jin Z, Yang C, et al. COMPASS II: extended coverage for polymer and drug-like molecule databases // Journal of molecular modeling. -2016. -V. 22. -N. 2. -P. 1-10.
  16. Rasheva Z., Zhang G., Burkhart Th. A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fiber sreinforced PEEK materials with different fiber orientations// Tribology International. -2010. -V. 43. -P. 1430–1437.
  17. Ли Сяньшунь, Седакова Е.Б. Моделирование влияния наноразмерных наполнителей на механические свойства и износостойкость композита на основе полиэфирэфиркетона // «Проблемы машиностроения и надежность машин». -2023. -№3. -С 64-69

Jarov V.E.<sup>1</sup>, Naunov A.N<sup>2</sup>, E.B. Sedakova<sup>2,3</sup>, Li Syanshun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC),  
Saint-Petersburg, Russia;

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

<sup>3</sup> Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of  
Sciences, Russia

**STUDY OF THE CAUSES OF TRIBOTECHNICAL EFFICIENCY OF FILLING  
POLYETHERETHERKETONE WHICH LESS WEAR-RESISTANCE DISPERSED  
FILLER DURING WEAR ON STEEL**

## Abstract

The possibility of using nanosized copper particles as a filler for polyether ether ether ketone (PEEK) has been investigated. On the basis of a physical model of wear, the possibility of developing a tribotechnically effective composite with a filler of low wear resistance has been investigated; calculated concentration dependences of the relative intensity of linear wear of the composite in relation to the matrix for four sizes of dispersed filler from the nano- and micro-size range have been constructed. As a result, the ranges of effective filler concentrations when nano-copper is introduced into PEEK were determined. A molecular dynamics method was applied to investigate the reasons for the increase in the wear resistance of the nanocomposite upon introduction of dispersed copper particles. It was obtained that the energy of intermolecular bonds significantly increases in the presence of filler. As a result of modeling of sliding friction of molecular models, differences in the density of molecules in the area of contact with the counterbody before and after shear, as well as differences in the values of the energies of intermolecular interaction between the contacting surfaces depending on the shear time were revealed. Comparison of the data obtained as a result of modeling the molecular structures of the polymer matrix and composite with the constructed concentration dependences of the relative intensity of linear wear of the composite in relation to the matrix allows us to identify an additional reason for the increase in wear resistance of the composite and, in the future, to assess the change in wear resistance of the composite and to estimate the change in wear resistance by the value of the change in the energy of intermolecular bonds.

*Keywords:* sliding friction, wear resistance, tribotechnical efficiency, physical model of wear, matrix loading, polyetheretherketone, nanofiller, molecular dynamics, energy of intermolecular interaction.

УДК 378.16:621.9(075.8)

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-253

Н.Н. Горобей, А.С. Лукьяненко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия, n.gorobey@mail.ru

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОБРАЗЦА ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОМ ПОЛИРОВАНИИ

### Аннотация

В данной работе детально описана физическая природа процессов при электролитно-плазменной полировке металлического анода с шероховатой поверхностью после механической полировки. Экспериментально установлено, что устойчивая парогазовая оболочка возникает при напряжениях  $U=300-400$  В. При этом температура анода – образца не повышается выше  $180^{\circ}\text{C}$ . Парогазовая оболочка необходима для возникновения канала искрового разряда между электролитом и анодом. Доля энергии одиночного разряда, расходуется на плавление вершины пирамидки поверхностного рельефа. В результате вершина пирамидки сглаживается за счет сил поверхностного натяжения. Рассматривая шероховатый поверхностный слой, как однородный поверхностный слой с тепловыми свойствами, отличными от свойств металлического образца, найден температурный градиент в поверхностном слое и определены условия эксперимента, при которых зона термического влияния