

**Чердынцев Виктор Викторович**

Tcherdyntsev Victor Victorovich

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
National University of Science and Technology "MISIS"

Старший научный сотрудник кафедры Физической Химии НИТУ «МИСиС»  
Senior Research Fellow Department of Physical Chemistry NUST "MISA"

Доктор физико-математических наук

E-Mail: [wch@isis.ru](mailto:wch@isis.ru)

**Бойков Андрей Анатольевич**

Boykov Andrey Anatolievich

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, 119049, Russia

Инженер 1-й категории, аспирант

The engineer of the 1st category, a graduate student

E-Mail: [Kink03@gmail.com](mailto:Kink03@gmail.com)

**Трибологические свойства полимерных нанокompозитов на основе  
сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полисульфона**

Tribological properties of polymer nanocomposites based on ultra high molecular  
weight polyethylene and polysulfone

**Аннотация:** Полимер матричные композиты широко используются в современной технике в качестве механизмов, таких как подшипники скольжения. Распространенным материалом для подшипников является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), а для шестерней в автомобилях используется полисульфон (ПСФ). Важной характеристикой для таких материалов являются трибологические свойства. В данной статье изучаются трибологические свойства полимер-матричных композитов на основе СВМПЭ и полисульфона с использованием в качестве наполнителя нанопорошок вольфрама и промышленный порошок карбида бора.

**The Abstract:** The polymer matrix composites are widely used in modern technology as tools, such as bearings. Common material for bearings is the ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), and for the gear in the car used polysulfone (PSF). An important characteristic of such materials are tribological properties. This article examines the tribological properties of polymer-matrix composites based on polysulfone and UHMWPE using a tungsten nanopowder as filler and industrial boron carbide powder.

**Ключевые слова:** СВМПЭ, термическая устойчивость, полисульфон, композит, полимер, трение.

**Keywords:** UHMWPE, thermal stability, polysulfone, composite, polymer, friction.

\*\*\*

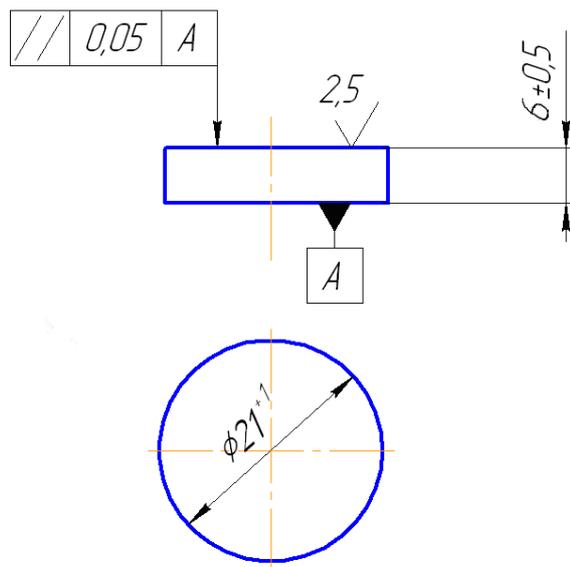
**Введение**

Композиты на основе полимерной матрицы являются перспективными материалами для использования в различных областях техники. Благодаря низкому коэффициенту трения и высокой химической стойкости их применяют в качестве упорных элементов фрикционных пар в подшипниках скольжения, насосах, экструдерах, компрессорах и др. Существует

значительное количество публикаций, посвященных разработке износостойких композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полисульфона. Многообразие упрочняющих и матричных материалов позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композита [1].

### Методика

Для определения трибологических характеристик использовались цилиндрические образцы, параметры которых приведены на рисунке 1.



*Рис. 1. Образцы-цилиндры для проведения трибологических испытаний*

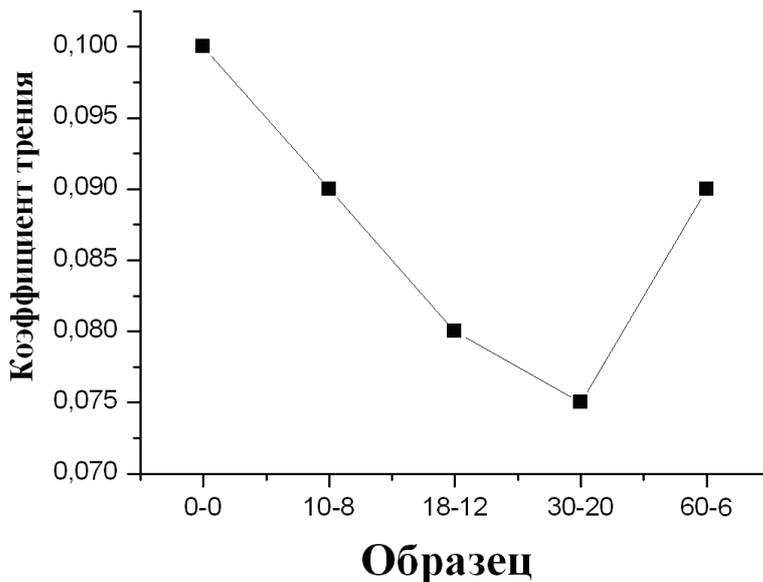
Трибологические испытания проводились на специальном испытательном стенде и с использованием универсального трибологического центра марки УМТ-ЗМТ в режиме сухого трения при комнатной температуре со скоростью скольжения 2,62 м/с, нормальная нагрузка в контакте составила 2,554 кг. Износостойкость образцов композиционных материалов оценивалась по площади пятна износа  $S$  образца, при достижении пути трения в 3,35 км. При проведении испытаний реализована следующая схема нагружения: вращающийся диск из исследуемого материала + контртело в виде неподвижного цилиндра, изготовленного из стали марки ШХ15. Перед началом трибологических испытаний проводилась приработка поверхности трения в течение 30 минут.

Результаты трибологических испытаний экспериментальных образцов представлены в таблице 1. Результаты испытаний показывают, что коэффициент трения образцов снижается при увеличении степени наполнения вольфрама и карбида бора. На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента трения от содержания вольфрама для образцов на основе СВМПЭ. Минимальное значение, равное 0,075, достигается для композитов, содержащих максимальное количество карбида бора (20% В4С и 30 масс. % W соответственно). Дальнейшее увеличение степени наполнения приводит к ухудшению трибологических свойств и отрицательно сказывается на величине коэффициента трения. Сходный характер поведения был выявлен и для величины износа композитов, постепенное снижение которого при увеличении степени наполнения говорит о том, что выбранные наполнители увеличивают износостойкость композитов. С ростом содержания наполнителей происходит и увеличение величины износа ответной детали.

**Таблица 1**

**Результаты трибологических испытаний**

| № | Композиция              | Содержание наполнителей, % масс. | №     |       |       |      | среднее | СКО |
|---|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------|---------|-----|
|   |                         |                                  | -     |       |       |      |         |     |
|   |                         |                                  | 1     | 2     | 3     |      |         |     |
| - | СВМП Э                  | 0                                | 0,105 | 0,099 | 0,096 | 0,10 | 0,004   |     |
| 1 | СВМП Э/В <sub>4</sub> С | 10/8                             | 0,087 | 0,095 | 0,086 | 0,09 | 0,004   |     |
| 2 | СВМП Э/В <sub>4</sub> С | 18/12                            | 0,084 | 0,075 | 0,08  | 0,08 | 0,004   |     |
| 3 | СВМП Э/В <sub>4</sub> С | 30/20                            | 0,086 | 0,089 | 0,096 | 0,09 | 0,004   |     |
| 4 | СВМП Э/В <sub>4</sub> С | 60/6                             | 0,093 | 0,096 | 0,081 | 0,09 | 0,006   |     |
| - | ПСФ                     | 0                                | 0,275 | 0,281 | 0,284 | 0,28 | 0,004   |     |
| 1 | ПСФ /В <sub>4</sub> С   | 10/8                             | 0,178 | 0,186 | 0,175 | 0,18 | 0,005   |     |
| 2 | ПСФ /В <sub>4</sub> С   | 18/12                            | 0,204 | 0,21  | 0,185 | 0,20 | 0,011   |     |
| 3 | ПСФ /В <sub>4</sub> С   | 30/20                            | 0,234 | 0,24  | 0,217 | 0,23 | 0,010   |     |
| 4 | ПСФ /В <sub>4</sub> С   | 60/6                             | 0,276 | 0,264 | 0,271 | 0,27 | 0,005   |     |



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента трения композита на основе СВМПЭ в зависимости от содержания карбида бора и нановольфрама

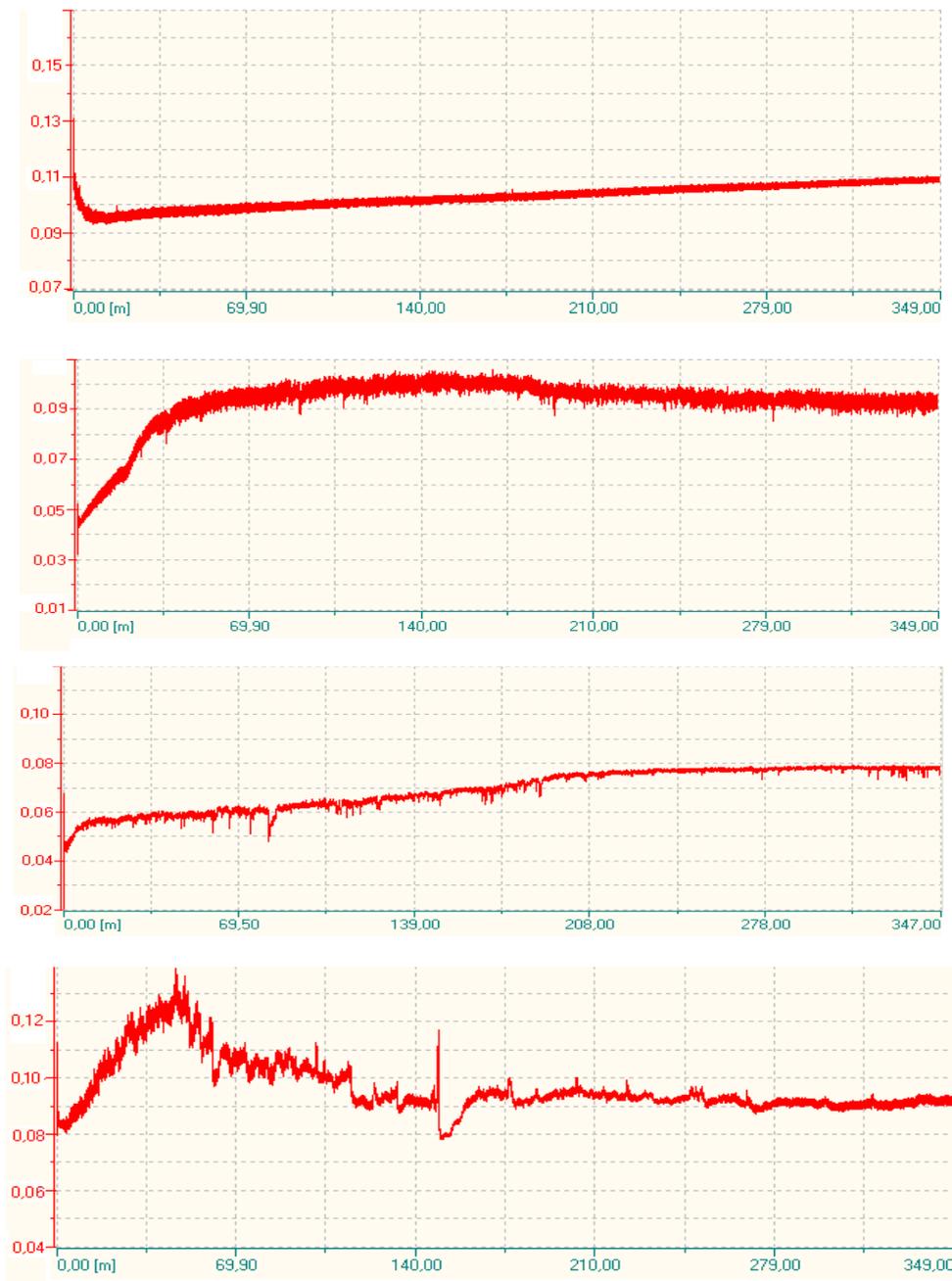
Временные зависимости коэффициента трения для образцов на основе СВМПЭ приведены на рисунке 3. Для чистого СВМПЭ (рисунок 3 а) на начальном участке наблюдается существенное снижение коэффициента трения. Этот участок отвечает этапу приработки контактирующих поверхностей, на нем происходит сглаживание механических неоднородностей поверхности экспериментального образца, залечивание существующих на его поверхности дефектов. На последующем этапе эксперимента значение коэффициента трения стабилизируется, наблюдается его незначительный рост. Характер кривой указывает на стабильный характер работы трибосопряжения.

Для композиционных образцов зависимости носят иной характер. На этапе приработки, в отличие от чистого СВМПЭ, здесь наблюдается рост коэффициента трения, что связано с особенностями формирования контактной поверхности в присутствии твердых неорганических включений. На последующем этапе коэффициент трения стабилизируется, работа сопряжения носит достаточно стабильный характер (рисунок 3 б, в). Следует отметить, что в отличие от чистого СВМПЭ, коэффициент трения при длительной продолжительности работы остается неизменным, возможно, это связано с тем, что для композитов адгезионная составляющая работы трибосопряжения не так сильно проявляет себя, как для чистого полимера. Для образца с высоким содержанием наполнителей на временной зависимости появляется значительное количество выбросов (рисунок 3 г), которые свидетельствуют об эрозийном износе поверхности, следует отметить, что режим работы трибосопряжения для этого образца не очень стабилен.

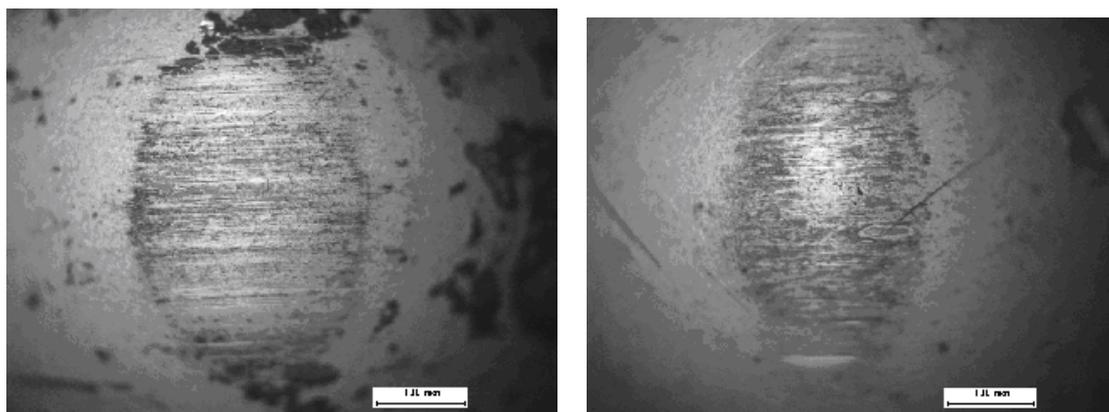
При всех испытаниях были изношены только образцы. Пятно износа для всех образцов на основе СВМПЭ по форме близко к эллипсу (рисунок 4), что свидетельствует о незначительности абразивного износа. На контртеле после испытания заметны продукты износа в виде легко удаляемого тонкого поглощающего свет порошка.

Временные зависимости коэффициента трения для образцов на основе ПСФ приведены на рисунке 5. Для чистого ПСФ (рисунок 5 а) зависимость аналогична наблюдаемой для СВМПЭ, вместе с тем, тенденции к повышению коэффициента трения со временем работы трибосопряжения не наблюдается, что говорит о том, что адгезия ПСФ к стали меньше, чем для СВМПЭ. На начальном участке наблюдается существенное снижение коэффициента

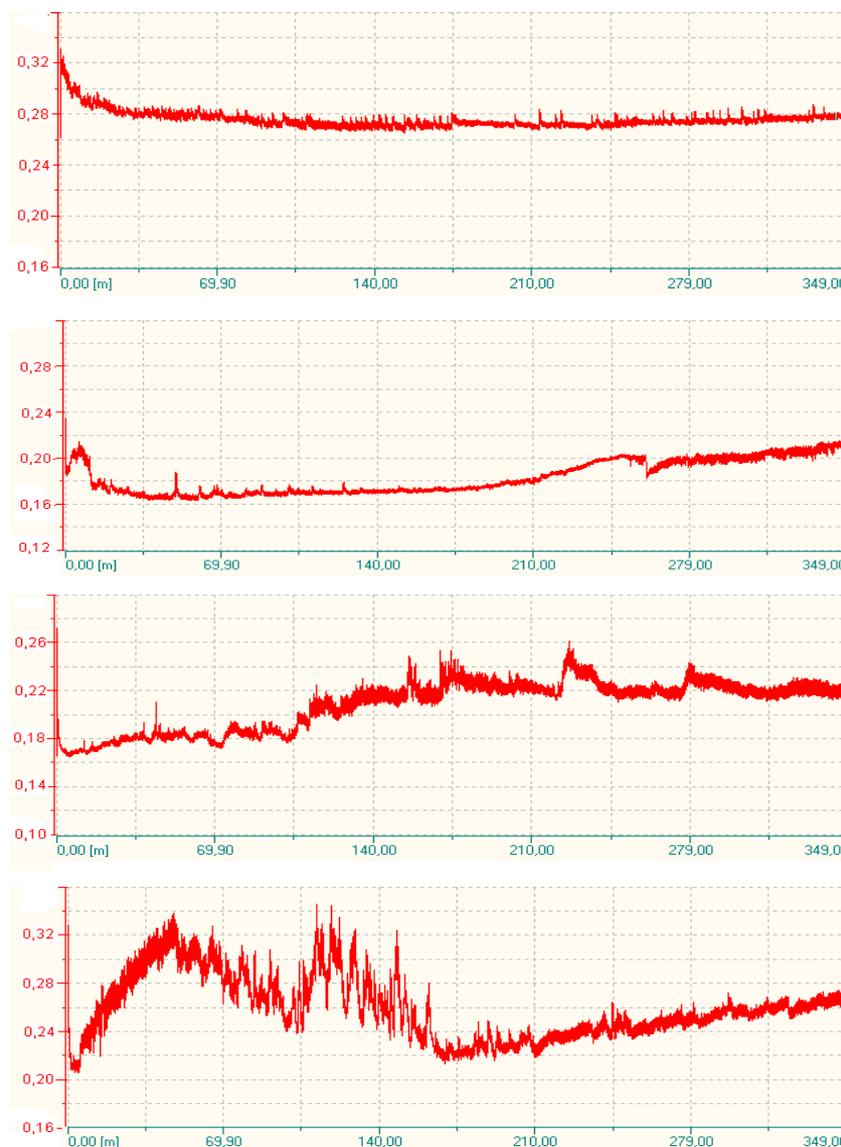
трения. Для композиционных образцов на основе ПСФ (рисунок 5, б – г) этап приработки менее выражен, чем для композитов на основе СВМПЭ. Основной особенностью трибоповедения композиционных материалов на основе ПСФ является заметная нестабильность работы. Присутствие на кривых изломов и выбросов может свидетельствовать о протекающем в них процессе эрозионного износа. Бесформенный характер пятна износа (рисунок б) указывает на то, что для композитов на основе ПСФ характерен абразивный износ, обусловленный попаданием в зону контакта твердых частиц неорганических наполнителей в результате их выкрашивания из полимерной матрицы.



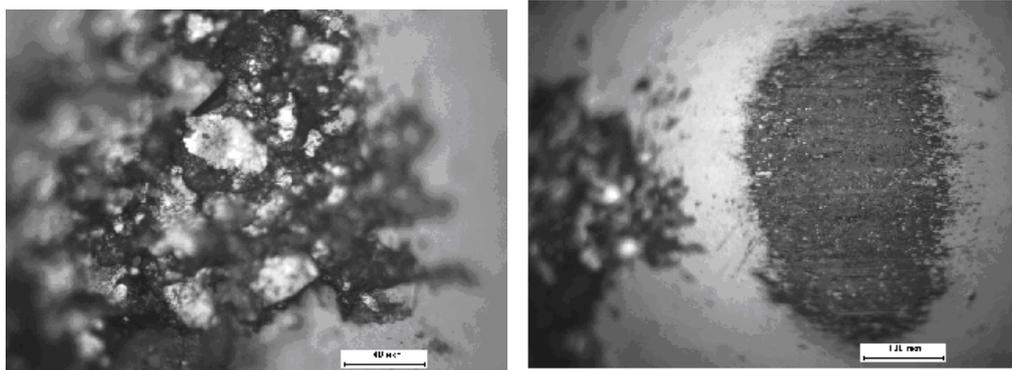
**Рис. 3.** Временные зависимости коэффициента трения для образцов на основе СВМПЭ, содержащих 10 и 12 (а), 18 и 12 (б), 30 и 12 (в), 60 и 6 (г) масс. % W и В<sub>4</sub>С, соответственно



**Рис. 4.** Микрофотографии пятен износа для образцов на основе СВМПЭ



**Рис. 5.** Временные зависимости коэффициента трения для образцов на основе ПСФ, содержащих 10 и 12 (а), 18 и 12 (б), 30 и 12 (в), 60 и 6 (г) масс. % W и В<sub>4</sub>С, соответственно



**Рис. 6.** Микрофотографии пятен износа для образцов на основе ПСФ

### **Выводы**

На основе результатов трибологических испытаний композиционных материалов на основе СВМПЭ, показано, что наилучшие значения коэффициента трения наблюдаются для композитов, содержащих максимальное количество карбида бора, введение же в композит наночастиц вольфрама приводит к ухудшению трибологических свойств и отрицательно сказывается на величине коэффициента трения. Установлено, что с увеличением содержания наполнителей происходит увеличение величины износа ответной детали. Показано, что наблюдаемый характер изменения коэффициента трения является результатом влияния наполнителей на твердость поверхностного слоя образцов.

Отличие трибологических свойств композитов на основе ПСФ состоит в том, что для композиционных материалов на основе ПСФ характерен абразивный износ.

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы», ГК 16.513.11.3148 от 15.06.2012.*

### **ЛИТЕРАТУРА**

1) С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. Полимерные композиционные материалы. // Прочность и технология. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. – 352 с.

**Рецензент:** Калошкин Сергей Дмитриевич, Директор института новых материалов и нанотехнологий НИТУ «МИСиС», доктор физико-математических наук.