

**Для цитирования:**

Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Иванова Л.Р., Шилько С.В., Буслевич Д.Г. Сравнение эффективности углеродных нано и микроволокон в формировании физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе высокомолекулярной матрицы. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 9. С. 99–105.

**For citation:**

Panin S.V., Kornienko L.A., Aleksenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V., Buslovich D.G. Comparison of effectiveness of carbon nano- and microfibers for formation of physical-mechanical and tribolotechnical parameters of polymer composites based on high molecular weight matrix. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 9. P. 99–105.

УДК 678.073:661.481

**С.В. Панин, Л.А. Корниенко, В.О. Алексенко, Л.Р. Иванова, С.В. Шилько, Д.Г. Буслевич**

Сергей Викторович Панин (✉)

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

Кафедра материаловедение в машиностроении, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: svp@ispms.tsc.ru (✉)

Людмила Александровна Корниенко, Лариса Рюриковна Иванова

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

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

Владислав Олегович Алексенко, Дмитрий Геннадьевич Буслевич

Кафедра материаловедение в машиностроении, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: vl.aleksenko@mail.ru

Сергей Викторович Шилько

Лаборатория механики композитов и биополимеров, Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси, пр. Кирова, 32а, Гомель, Беларусь, 246050

E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ НАНО И МИКРОВОЛОКОН  
В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОЙ МАТРИЦЫ**

*Для сравнительной оценки эффективности твердосмазочных свойств нано- и микроволокон углерода в композитах на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена исследованы механические и триботехнические характеристики смесей на основе СВМПЭ в условиях сухого трения и абразивного износа. Показано, что износостойкость полимерных композиций СВМПЭ+0,5 масс. % С (нано) возрастает в 6,6 раз, а композиций СВМПЭ+5масс. % С (микро) в 2,5 раза в условиях сухого трения скольжения. В условиях абразивного изнашивания износостойкость указанных композитов увеличивается примерно в 2 раза для обоих типов наполнителей. Обсуждается роль нано- и микроволокон углерода как твердой смазки в трибосопряжениях полимерных композиций на основе СВМПЭ, для применения в различных условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, наполнитель, графит, износостойкость, надмолекулярная структура

**S.V. Panin, L.A. Kornienko, V.O. Aleksenko, L.R. Ivanova, S.V. Shilko, D.G. Buslovich**

Sergey V. Panin (✉)

Laboratory of Mechanics of Composite Polymer Coatings, Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, Academicheskii pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia  
Dept. Materials Science in Mechanical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina pr., 30, Tomsk, 634050, Russia  
e-mail: svp@ispms.tsc.ru (✉)

Lyudmila A. Kornienko, Larisa R. Ivanova

Laboratory of Mechanics of Composite Polymer Coatings, Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, Academicheskii pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia  
e-mail: rosmc@ispms.tsc.ru, lir1952@mail.ru

Vladislav O. Aleksenko, Dmitriy G. Buslovich

Department of Materials Science in Mechanical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina pr., 30, Tomsk, 634050, Russia  
e-mail: vl.aleksenko@mail.ru

Sergey V. Shilko

Department of Mechanics of Composites and Biopolymers, Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of NAN B, Kirova pr., 32 a, Gomel, 246050, Belarus  
E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

### **COMPARISON OF EFFECTIVENESS OF CARBON NANO- AND MICROFIBERS FOR FORMATION OF PHYSICAL-MECHANICAL AND TRIBOLOTECHNICAL PARAMETERS OF POLYMER COMPOSITES BASED ON HIGH MOLECULAR WEIGHT MATRIX**

*The mechanical and tribo-technical parameters of composite materials of mixtures on the bases of super- molecular polyethylene (SMPE) at conditions of dry friction and abrasive wear were studied for comparative estimation of solid- grease properties of nano and micro fibers of carbon. It was shown that wear resistance of polymer compositions of SMPE+0.5 weight% the percent of C(nano) increases by a factor 6.6 and for SMPE+5 weight% the percent of C(micro) increases by a factor 2.5 at conditions of dry friction of slip. At conditions of abrasive wear the resistance of composites mentioned above increases by a factor about 2 for both types of fillers. The role of nano and micro fibers of carbon is discussed as solid grease in tribo- conjugated polymer compositions based on SMPE for application at various conditions of operation.*

**Key words:** ultrahigh molecular polyethylene, filler, graphite, wear resistance, supramolecular structure

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) в ряду полимерных материалов обладает приемлемыми характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и химической стойкостью в агрессивных средах, высокой ударной вязкостью, низкой температурой охрупчивания. Это обеспечивает возможность его широкого применения в различных областях техники, включая экстре-

мальные условия эксплуатации: направляющие рудоспусков, футеровки угольных и цементных вагонов и кузовов крупнотоннажного автотранспорта, узлы трения машин механизмов и др. Применение композиционных материалов на основе СВМПЭ позволяеткратно повысить износостойкость тяжело нагруженных изделий [1-4]. В последнее время активно разрабатываются микро- и нанокомпозиты на основе СВМПЭ [5-10]. Тип и размер наполнителей определяются областью

применения и средой использования композиций (вакуум, химически активная и инертная среда, низкие либо повышенные температуры).

Дисперсный графит активно используется в качестве смазки (добавки в масла), а также антифрикционных покрытий в широком температурном режиме (-45 до +400 °С). Благодаря слоистому строению решетки, графит имеет высокую адгезию к металлической поверхности, быстро формируя микрослой (защитную пленку), залечивающий микротрещины и зазоры, выравнивая поверхность трения [5]. Данный слой имеет высокую прочность, и в процессе эксплуатации трибосопряжения происходит взаимное перемещение пластинок (чешуек) графита, тем самым снижается трение и изнашивание деталей машин и изделий.

Для трибосопряжений «металл – СВМПЭ» графит может быть использован как твердая смазка при недостатке либо в отсутствии смазочной среды [6]. 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 одновременного применения наполнителя и в роли твердой смазки исследованы трибомеханические характеристики композитов на основе СВМПЭ с углеродными микро- и нановолокнами в условиях сухого трения и абразивного изнашивания. Проведен сравнительный анализ эффективности углеродных микро- и микроволокон в формировании триботехнических характеристик полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн и размером частиц порошка 5-15 мкм, углеродные микроволокна средней длиной ~65 мкм ( $\varnothing$  7,5 мкм), углеродные нановолокна «Таунит» ( $\varnothing$  10 нм) производства ООО "НаноТехЦентр" (г. Тамбов). Образцы полимерных композитов получали компрессионным спеканием при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 5 °С/мин.

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 материалов в режиме су-

хого трения определяли по схеме «вал-колодка» при нагрузке на пару образцов 160 Н и скорости вращения вала 100 об/мин в соответствии с ASTM G99 на машине трения СМТ-1 (скорость скольжения при этом составляет 0,32 м/сек). Размер образцов равнялся  $V \times Ш \times Д = 7 \times 7 \times 10$  мм. Диаметр контртела из стали ШХ15 составлял 62 мм. Поверхности трения образцов исследовали на оптическом профилометре Zygo New View 6200.

Испытания на абразивный износ проводили на машине для тестирования резины на истираемость МИ-2 (ГОСТ 426). Триботехнические испытания проводили при нагрузке 0,15 МПа и скорости скольжения вала относительно пары образцов 17,0 м/мин. Использовали частицы закрепленного абразива Р 240 (на бумажной основе) с размером зерна 58,5 мкм.

Структурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены механические свойства композиций на основе СВМПЭ с углеродными микро- и нановолокнами. Прочностные свойства композиций с микроволокнами (твердость, предел прочности) возрастают при наполнении матрицы, тогда как нановолокна существенно изменяют механические характеристики СВМПЭ ( $\sigma_B = 32,7$  против 32,3 МПа при оптимальном содержании 0,5 масс.% нанонаполнителя).

Триботехнические характеристики (интенсивность износа, коэффициент трения) значительно изменяются при наполнении СВМПЭ микро- и нановолокнами углерода. Коэффициент трения композиций уменьшается до двух раз (табл. 1). На рис. 1 представлена диаграмма интенсивностей изнашивания при сухом трении скольжения композитов на основе СВМПЭ с углеродными микро- и нановолокнами. Из рисунка видно, что интенсивность износа СВМПЭ уменьшается в 6,6 раз при содержании нановолокон 0,5 масс. %, а при наполнении микроволокнами – в 2,5 раза при их содержании 5 масс. %. На этом основании указанное содержание наполнителей является оптимальным для данных композитов на основе СВМПЭ с позиций достижения их максимальной износостойкости.

**Таблица 1**  
**Механические свойства композиций СВМПЭ с микро и макро углеродными волокнами**

**Table 1. Mechanical properties of UHMWPE composites filled with carbon micro- and nano- fibers**

Содержание наполнителя, масс. %	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору $D$	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Удлинение до разруш. $\epsilon$ , %	Коэффициент трения $f$
0	0,934	57,7	32,3	485	0,120
0,1	0,929	57,6	34,1	426	0,086
0,3	0,931	57,7	33,2	386	0,075
0,5	0,933	58	32,7	384	0,071
1	0,936	57,9	29,9	353	0,086
3	0,938	58,3	35,7	417	0,079
5	0,947	58,5	35,3	412	0,061
10	0,969	58,7	34,8	369	0,061
20	1,017	60,4	30,9	293	0,088

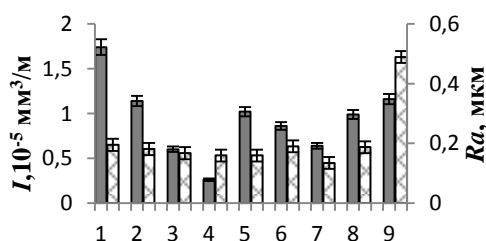


Рис. 1. Интенсивность изнашивания ( $I$ ) и шероховатость поверхности дорожки трения ( $Ra$ ) СВМПЭ (1), СВМПЭ+0,1 масс. % С (нано,2), СВМПЭ+0,3 масс. % С (нано,3), СВМПЭ+0,5 масс. % С (нано,4), СВМПЭ+1 масс. % С (нано,5), СВМПЭ+3 масс. % С (микро,6), СВМПЭ+5 масс. % С (микро,7), СВМПЭ+10 масс. % С (микро,8), СВМПЭ+20 масс. % С (микро,9) на стадии установившегося износа в условиях сухого трения скольжения

Fig. 1. Wear intensity ( $I$ ) and surface roughness of a friction track ( $Ra$ ) UHMWPE (1), UHMWPE+0.1 wt. % C (nano-,2), UHMWPE+0.3 wt. % C (nano-, 3), UHMWPE+0.5 wt. % C (nano-,4), UHMWPE+1 wt. % C (nano-,5), UHMWPE+3 wt. % C (micro-, 6), UHMWPE+5 wt. % C (micro-, 7), UHMWPE+10 wt. % C (micro-, 8), UHMWPE+20 wt. % C (micro-, 9) at the state steady step of wear under dry sliding friction

Зависимость шероховатости поверхности изнашивания от содержания наполнителя идентична таковой для интенсивности износа (рис. 1). Рис. 2 а-и иллюстрируют поверхность изнашивания и надмолекулярную структуру композитов с оптимальным содержанием микро- и нановолокон углерода. Видно, что в микро- и нанокompозитах СВМПЭ с оптимальным содержанием наполнителя сформирована сферолитная надмолекулярная структура [10].

В работе исследовано абразивное изнашивание композитов на основе СВМПЭ с нано- и микроволокнами. На рис. 3 показана диаграмма абразивной износостойкости композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием углеродных микро- и нановолокон. Из рис. 3 следует, что ин-

тенсивность абразивного изнашивания нано- и микрокомпозитов на основе СВМПЭ с углеродными волокнами близки: износостойкость нанокомпозитов повышается примерно в 1,7 раз для всех составов, а в микрокомпозитах примерно в 2 раза. Дополнительным подтверждением этому служат приведенные на рис. 4 микрофотографии поверхностей износа нано- и микрокомпозитов на основе СВМПЭ.

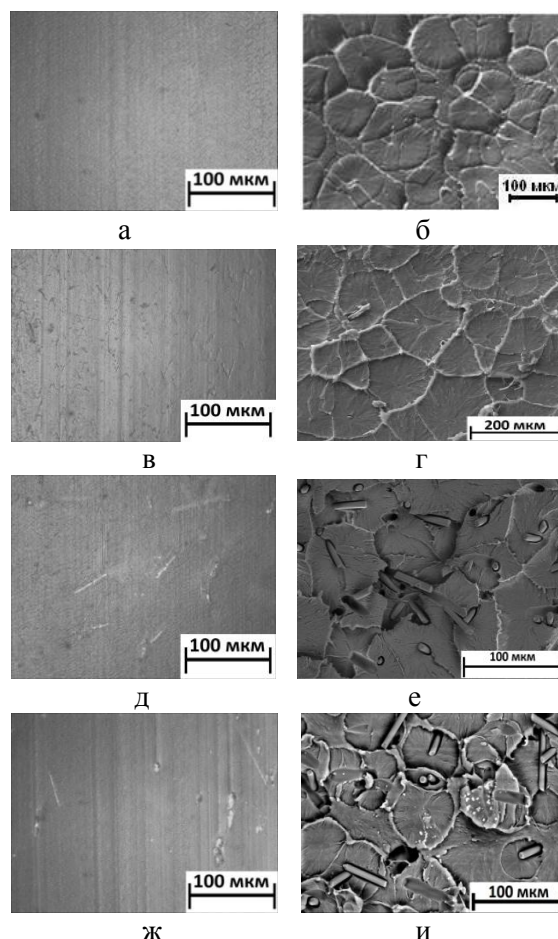


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей износа и надмолекулярной структуры СВМПЭ (а, б), СВМПЭ+0,5 масс. % С (нано, в и г), СВМПЭ+5 масс. % С (микро, д и е), СВМПЭ+5 масс. % С, нано+5 масс. % С, микро (ж, и) на стадии установившегося износа в режиме сухого трения

Fig. 2. The microimages of wear surfaces and supramolecular structure of UHMWPE (а, б), UHMWPE+0.5 wt. % C nanofibers (в, г), UHMWPE+5 wt. % C microfibers (д, е), UHMWPE+5 wt. % C, nano+5 wt. % C, micro (ж, и) at the steady state stage of wear in a mode of dry friction

Сравнительный анализ роли углеродных микро- и нановолокон в обеспечении износостойкости композитов на основе СВМПЭ в условиях сухого трения скольжения и при абразивном

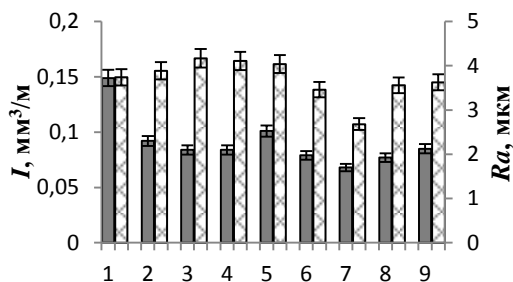


Рис. 3. Интенсивность изнашивания (I) и шероховатость поверхности дорожки трения (Ra) СВМПЭ (1), СВМПЭ+0,1 масс. % С (нано,2), СВМПЭ + 0,3 масс. % С (нано,3), СВМПЭ + 0,5 масс. % С (нано,4), СВМПЭ + 1 масс. % С (нано,5), СВМПЭ + 3 масс. % С (микро,6), СВМПЭ + 5 масс. % С (микро,7), СВМПЭ + 10 масс. % С (микро,8), СВМПЭ + 20 масс. % С (микро, 9) при абразивном изнашивании. Р 240

Fig. 3. Wear intensity (I) and surface roughness of a friction track (Ra) UHMWPE (1), UHMWPE + 0.1 wt. % C (nano-, 2), UHMWPE + 0.3 wt. % C (nano-, 3), UHMWPE + 0.5 wt. % C (nano-, 4), UHMWPE + 1 wt. % C (nano-, 5), UHMWPE + 3 wt. % C (micro-, 6), UHMWPE + 5 wt. % C (micro-, 7), UHMWPE + 10 wt. % C (micro-, 8), UHMWPE + 20 wt. % C (micro-, 9) under abrasive wear. P 240

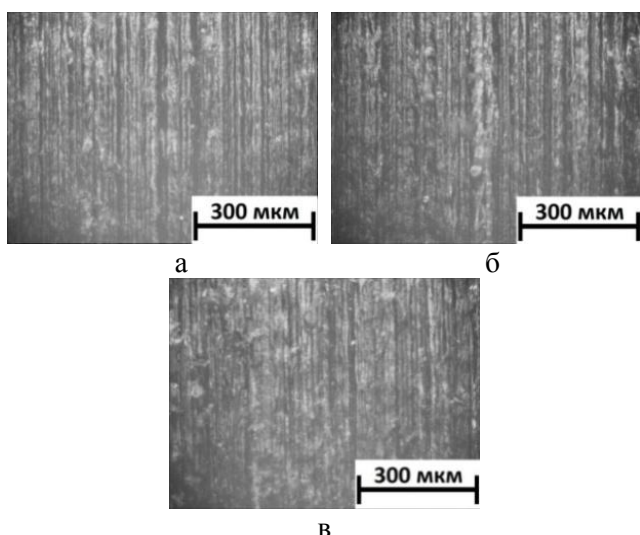


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей износа при абразивном износе СВМПЭ (а), СВМПЭ + 0,5 масс. % С (нано) (б), СВМПЭ + 5 масс. % С (микро) (в)

Fig. 4. Micro-images of wear surfaces under abrasive wear: UHMWPE (a), UHMWPE + 0.5 wt. % C (nano-, б), UHMWPE + 5 wt. % C (micro-, в)

изнашивании показывает, что углеродные нановолокна при содержании 0,5 масс. % оказываются в 2,6 раз эффективнее микроволокон (при их оптимальном содержании 5 масс. %) в условиях сухого трения скольжения. Нановолокна, будучи диспергированы в полимерной матрице, при трибонагрузении оказываются более равномерно нагруженными. Передача на них механической нагрузки от стального вращающегося контртела в условиях их «запрессовки» в полимерной матрице должна

сопровождаться их «осцилляцией» в слое трибоконтакта. В результате помимо скольжения по полимерной матрице, нановолокна могут выступать в качестве постоянной твердосмазочной среды в металл-полимерном сопряжении и, тем самым, эффективно снижая интенсивность изнашивания полимерной компоненты узла трения в условиях сухого скольжения.

При введении микроволокон в количестве 5 масс. % на поверхности трения в явном виде наблюдаются лишь отдельные неупорядоченно ориентированные волокна (рис. 2, д). С одной стороны, они обеспечивают армирование поверхностного слоя (что подтверждается данными механических испытаний), что также должно благоприятно сказываться на повышении сопротивления изнашиванию. С другой стороны, они не могут обеспечивать эффективного смазывающего эффекта. По этой причине они в существенно меньшей степени способствуют повышению сопротивления изнашиванию по сравнению с нановолокнами. Возможно, микроволокон оказываются эффективными с точки зрения обеспечения теплоотвода от поверхности трения. Однако данный эффект требует дополнительного изучения.

В условиях же абразивного износа имеет место резание матрицы частицами закрепленного абразива, когда наполнитель (нано- и микро) не способен оказывать сопротивления его деструктивному воздействию вследствие несоизмеримости размеров наполнителя и зерна абразива (Р 240 – 58,5 мкм) [7, 9]. По этой причине абразивная износостойкость рассмотренных выше композитов определяется, в основном, размером зерна абразива и прочностью сформировавшейся надмолекулярной структуры.

**Таблица 2**  
**Механические свойства композиций СВМПЭ с нано и микро углеродными волокнами оптимального состава**

**Table 2. Mechanical properties of UHMWPE composites filled with optimal content of carbon micro- and nano- fibers**

Содержание наполнителя, масс. %	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору D	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Удлинение до разруш. $\epsilon$ , %	Коэффициент трения f
0	0,934	57,7	32,3	485	0,120
0,5	0,933	58	32,7	384	0,071
5	0,947	58,5	35,3	412	0,061
0,5+5	0,954	58,6	35,1	402	0,058



Для оценки конкурирующего вклада нано- и микроволокон углерода в механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ исследованы свойства тройного композита с оптимальным содержанием нано- и микро-волокон (СВМПЭ+0,5 масс. % С, нано- и СВМПЭ+5 масс. % С, микро-). В табл. 2 для целей сравнения представлены механические характеристики образцов чистого СВМПЭ, а также композитов на основе двух- и трехкомпонентной смеси с оптимальным содержанием наполнителей. Видно, что твердость, предел прочности и удлинение при растяжении остаются на уровне двухкомпонентных смесей. Коэффициент трения  $f$  снизился незначительно.

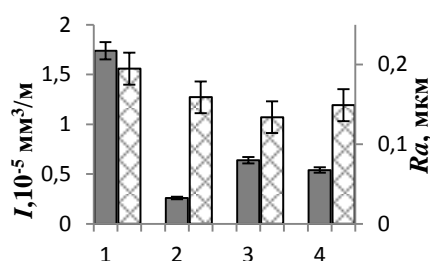


Рис. 5. Интенсивность изнашивания ( $I$ ) и шероховатость поверхности дорожки трения ( $Ra$ ) СВМПЭ (1), СВМПЭ+0,5 масс. % С (нано, 2), СВМПЭ+5 масс. % С (микро, 3), СВМПЭ+0,5 масс. % С+5 масс. % С (микро, 4) на стадии установившегося износа в режиме сухого трения

Fig. 5. Wear intensity ( $I$ ) and surface roughness of a friction tracks ( $Ra$ ) UHMWPE (1), UHMWPE+0,5 wt. % C (nano-, 2), UHMWPE +5 wt. % C (micro-, 3), UHMWPE+0,5 wt. % C+5 wt. % C (micro-, 4) at the steady state stage of wear in a mode of dry friction

Данные об интенсивности изнашивания тройного композита на основе СВМПЭ представлены на рис. 5 (столбец 4). Видно, что износостойкость композита на основе трехкомпонентной

смеси незначительно превышает таковую для двойного микрокомпозита (столбец 3), но ниже чем для нанокомпозита (столбец 2), т.е. аддитивного эффекта от смешений разномасштабных компонентов не происходит. Это может быть объяснено тем, что положительный вклад углеродных нановолокон как постоянной твердой смазки в «металл-полимерных» трибосопряжениях в определенной степени нивелируется наличием в полимерной матрице микроволокон, препятствующих равномерному распределению первых и их роли в перераспределении нагрузки от полимерной матрицы к наполнителю (рис. 2, ж, и).

## ВЫВОДЫ

Композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с углеродными нановолокнами эффективны в условиях сухого трения скольжения металл-полимерных трибосопряжений, повышая износостойкость СВМПЭ до 6,6 раза. Углеродные микроволоконны повышают прочностные свойства СВМПЭ при одновременном повышении его износостойкости не более, чем в 2,5 раза.

Углеродные нано- и микроволоконны выполняют роль твердой смазки при трибосопряжении композитов на основе СВМПЭ и обеспечивают высокую износостойкость таких композитов в экстремальных условиях эксплуатации (например, низкие температуры, агрессивные среды и пр.).

При отсутствии адгезии между наполнителем и СВМПЭ-матрицей удается получить микро (СВМПЭ+5,0 масс.% УМВ) и нанокомпозиты (СВМПЭ+0,5 масс.% УНВ) с повышенной износостойкостью для работы узлов трения в отсутствии смазочной среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stein H.L. Engineered Materials Handbook. Engineering Plastics. 1999. V. 2.
2. Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V. *J. Appl. Polym. Sci.* 2007. V. 104. P. 4173-4181.
3. Zhou J., Yan F. *J. Appl. Polym. Sci.* 2005. V. 96. P. 2336-2343.
4. Wei Z., Zhao Y.P., Ruan S.L., Gao P. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites. *Surface and interface analysis.* 2006. V. 38. P. 883-886.
5. Краснов А.П., Адери́ха В.Н., Афоничева О.В., Мить В.А., Тихонов Н.Н., Васильков А.Ю., Саид-Галиев Э.Е., Наумкин А.В., Николаев А.Ю. О систематизации нанонаполнителей полимерных композитов. *Трение и износ.* 2010. Т. 31. № 1. С. 93-108.

## REFERENCES

1. Stein H.L. Engineered Materials Handbook. Engineering Plastics. 1999. V. 2.
2. Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V. *J. Appl. Polym. Sci.* 2007. V. 104. P. 4173-4181.
3. Zhou J., Yan F. *J. Appl. Polym. Sci.* 2005. V. 96. P. 2336-2343.
4. Wei Z., Zhao Y.P., Ruan S.L., Gao P. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites. *Surface and interface analysis.* 2006. V. 38. P. 883-886.
5. Krasnov A.P., Aderikha V.N., Afonicheva O.V., Mit' V.A., Tikhonov N.N., Vasilkov A.Yu., Said-Galiev A.E., Naumkin A.V., Nikolaev A.Yu. About systematization of polymer composite nanofillers. *Trenie i iznos.* 2010. V. 31. N 1. P. 93-108 (in Russian)

6. **Панин С.В., Корниенко Л.А., Нгуен Суан Т., Иванова Л.Р.** Антифрикционный материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного твердосмазочными частицами. *Известия высших учебных заведений. Серия: физика*. 2015 Т. 58. № 6-2. С. 211-215.
7. **Panin S.V., Kornienko L.A., Sergeev V.P., Sonjaitham N., Tchaikina M.V.** *J. Nanotechnology*. 2012. Article ID 729756. 7 p.
8. **Ruan S.L., Gao P., Yang X.G., Yu T.X.** *Polymer*. 2003. V. 44. N 19. P. 5643-5654.
9. **Виноградов А.В., Охлопкова А.А.** *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 5. С. 931-937.
10. **Панин С.В., Панин В.Е., Корниенко Л.А., Пувадин Т.** *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2011. Т. 54. Вып. 7. С. 102-106.
6. **Panin S.V., Kornienko L.A., Nguyen Xuan T., Ivanova L.R.** The anti-friction material on the basis of UHMWPE filled with solid lubricating particles. *Izv.vuzov. Fizika*. 2015. V. 58. N 6-2. P. 211-215 (in Russian)
7. **Panin S.V., Kornienko L.A., Sergeev V.P., Sonjaitham N., Tchaikina M.V.** *J. Nanotechnology*. 2012. Article ID 729756. 7 p.
8. **Ruan S.L., Gao P., Yang X.G., Yu T.X.** *Polymer*. 2003. V. 44. N 19. P. 5643-5654.
9. **Vinogradov A.V., Okhlopko A.A.** *Trenie I iznos*. 1995. V. 16. N 5. P. 931-937 (in Russian)
10. **Panin S.V., Panin V.E., Kornienko L.A., Puvadin T.** *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*. 2011. V. 54. N 7. P. 102-106 (in Russian).

*Поступила в редакцию 21.06.2016  
Принята к опубликованию 09.08.2016*

*Received 21.06.2016  
Accepted 09.08.2016*