

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА МАТРИЦЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

С.В. Панин, В.О. Алексенко, Л.А. Корниенко, Д.Г. Буслович, Н.Н. Валентюкевич

Сергей Викторович Панин*, Владислав Олегович Алексенко, Дмитрий Геннадьевич Буслович
Лаборатория механики полимерных композиционных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, Российская Федерация, 634055
Отделение материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: svp@ispms.tsc.ru*, vl.aleksenko@mail.ru, dgb2@tpu.ru

Людмила Александровна Корниенко

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

Наталья Николаевна Валентюкевич

Отделение материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: natalya.valentyukevich@mail.ru

Исследованы многокомпонентные композиты на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), армированные короткими углеродными волокнами (КУВ) и наполненные твердосмазочными частицами мелкодисперсного политетрафторэтилена (ПТФЭ). Показано, что введение сразу двух микронаполнителей (твердосмазочного и армирующего) в матрицу СВМПЭ позволяет одновременно обеспечить повышение механических характеристик (модуль упругости, предел текучести, твердость по Шору D) и сопротивления изнашиванию трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ в различных условиях трибонагружения. Показано, что при умеренных скорости скольжения ($V=0,3$ м/с) и нагрузке ($P=60$ Н) рациональным составом композита для обеспечения максимального сопротивления изнашиванию в условиях сухого трения скольжения является “СВМПЭ+5 вес.% флуралита+5 вес.% КУВ” (износостойкость повышается вдвое). Это обусловлено тем, что сформированная структура и отклик материала на поверхности трибоконтакта (поверхности трения) на триботехническое нагружение за счет формирования пленки переноса позволяют повысить сопротивление изнашивающему воздействию скользящего стального контртела. В жестких условиях трибоиспытаний ($P=140$ Н× $V=0,5$ м/с) двукратное увеличение износостойкости показывает композит “СВМПЭ+5 вес.% флуралита+10 вес.% КУВ”. Это обусловлено армирующим действием коротких углеродных микроволокон, которые в условиях повышенных температур, вызванных фрикционным нагревом, стимулирующих подплавление и пластификацию поверхностного слоя трибоконтакта, позволяют лучше защитить поверхность трения от комбинированного воздействия сжимающих и сдвигающих нагрузок, передаваемых от стального контртела. С учетом данных о формировании структуры, а также температуре в трибоконтакте, изменении коэффициента трения и топографии поверхностей износа обсуждаются механизмы изнашивания многокомпонентных композитов на основе СВМПЭ.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, твердосмазочный наполнитель, политетрафторэтилен, углеродные волокна, износостойкость, надмолекулярная структура

MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT SOLID LUBRICANT COMPOSITES BASED ON ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE

S.V. Panin, V.O. Alexenko, L.A. Kornienko, D.G. Buslovich, N.N. Valentyukevich

Sergey V. Panin*, Vladislav O. Alexenko, Dmitry G. Buslovich

Laboratory of Mechanics of Composite Polymer Coatings, Institute of Strength Physics and Materials Science of SB of RAS, Academicheskii pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia
Division for Materials Science, School of Advanced Manufacturing Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina pr., 30, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: svp@ispms.tsc.ru*, vl.aleksenko@mail.ru, dgb2@tpu.ru

Lyudmila A. Kornienko

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

Natalya N. Valentyukevich

Division for Materials Science, School of Advanced Manufacturing Technologies, National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina pr., 30, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: natalya.valentyukevich@mail.ru

Multicomponent composites with ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) matrix reinforced by short carbon fibers (CF) and filled with solid lubricant particles of finely dispersed polytetrafluoroethylene (PTFE) have been studied. It is shown that simultaneous loading of two kinds of microfillers (enforcing and solid lubricant) ensures increasing both mechanical properties (elastic modulus, yield point, shore D hardness) and wear resistance of three-component UHMWPE composites at variation of triboloading conditions. It is shown that at moderate sliding velocity ($V = 0.3$ m/s) and load ($P = 60$ N) the rational composition providing maximum wear resistance under dry sliding friction is “UHMWPE + 5 wt. % fluorolite + 5 wt. % CF” (wear resistance is doubled). The latter results from the pattern of the formed permolecular structure and friction surface material response onto tribotechnical loading (due to formation of transfer film). Under severe tribotesting conditions ($P = 140$ N \times $V = 0.5$ m/s) the two-fold increase in wear resistance demonstrates the composite “UHMWPE + 5 wt. % fluorolite + 10 wt. % CF”. This effect is mostly governed by enforcing action of short carbon fibers. The mechanism of this improvement might be explained in the following way. Friction heating induced increase of the temperature gives rise to local melting and surface layer plasticization. Presence of enforcing fibers ensures better protection of the friction surface from combined action of compressive and shear forces transferred from rotating steel counterface. Friction coefficient, topography of wear track surfaces and wear mechanisms of multicomponent UHMWPE composites are discussed taking into account the data on permolecular structure formation and the temperature in the tribocontact zone.

Key words: ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE), solid lubricant filler, Teflon, short carbon fibers, wear resistance, permolecular structure

Для цитирования:

Панин С.В., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Буслович Д.Г., Валентюкевич Н.Н. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 88–95

For citation:

Panin S.V., Alexenko V.O., Kornienko L.A., Buslovich D.G., Valentyukevich N.N. Mechanical and tribotechnical properties of multicomponent solid lubricant composites based on ultra high molecular weight polyethylene. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 11. P. 88–95

ВВЕДЕНИЕ

Антифрикционные полимерные композиционные материалы широко применяются в составе узлов трения, а также в качестве уплотнительных элементов в различных видах современной техники и медицине, определяя их надежность и долговечность. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) занимает особое место среди полимерных смол благодаря хорошим деформационно-прочностным показателям, низкому коэффициенту трения, высокой износостойкости, химической стойкости к агрессивным средам, широкому температурному интервалу формостабильности. Этот комплекс свойств позволяет применять СВМПЭ в изделиях, обладающих стойкостью к ударным воздействиям, растрескиванию и истиранию.

Выбором наполнителей можно целенаправленно изменять функциональные свойства и расширять область использования СВМПЭ в машиностроении, химических технологиях, сельском хозяйстве и других областях техники. При разработке композиционных материалов на основе СВМПЭ, как правило, ориентируются на преимущественные условия их эксплуатации: сухое трение, трение в граничной смазке либо жидкой среде, абразивный износ и др. Поэтому разработка трех- и более компонентных композитов на СВМПЭ-матрице позволяет одновременно повысить прочностные свойства и износостойкость, в частности за счет введения армирующих волокон и твердосмазочных наполнителей. Так углеродные микроволокна позволяют повысить модуль упругости и предел текучести, а мелкодисперсный политетрафторэтилен обеспечить твердосмазочные свойства композита [1-7].

В настоящей работе исследованы механические и триботехнические характеристики двух- и трехкомпонентных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного короткими углеродными микроволокнами и мелкодисперсным политетрафторэтиленом в условиях различных нагрузок и скоростей скольжения (60 Н×0,3 м/с, 60 Н×0,5 м/с, 140 Н×0,3 м/с, 140 Н×0,5 м/с) в металло-полимерных трибоузлах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовали порошок СВМПЭ GUR-2122 (Ticona, Германия) молекулярной массой 4,0 млн. и размером частиц 5÷15 мкм, порошок ПТФЭ марки Ф-4 «Флуралит» (ООО - Флуралит синтез) размером менее 3 мкм, короткие углеродные микроволокна средней длиной ~65 мкм (Ø 7,5 мкм), привитый полиэтилен высокой

плотности HDPE-g-SMA, размер частиц ~150 мкм (ООО «Новые полимерные технологии»).

Перемешивание порошков полимерного связующего СВМПЭ и наполнителей проводили в планетарной шаровой мельнице MP/0,5·4 (ООО «Техноцентр») с предварительным диспергированием в ультразвуковой ванне взвеси компонентов в этиловом спирте.

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

Износостойкость образцов в режиме сухого трения определяли по схеме «вал-колодка» при нагрузках на образец, закрепленный в держателе, $P = 60$ и 140 Н и скоростях скольжения $V = 0,3$ и $0,5$ м/с на машине трения 2070 СМТ-1 (ПО «Точприбор») в соответствии с ASTM G99/DIN 50324. Размер образцов равнялся $15,8 \times 6,4 \times 10,0$ мм³. Диаметр контртела, выполненного из стали ШХ15, составлял 35 мм. Величину износа определяли по глубине дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor).

Степень кристалличности оценивали на совмещенном анализаторе SDT Q600 (Thermo Fisher Scientific). Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально исследовали механические свойства и надмолекулярную структуру двухкомпонентных композитов на основе СВМПЭ с различным количеством мелкодисперсного политетрафторэтилена (флуралита) с целью определения оптимального его содержания. При этом было необходимо в максимальной степени сохранить сферолитную надмолекулярную структуру при минимальном снижении прочностных свойств относительно ненаполненного полимера. В табл. 1 приведены механические характеристики композитов «СВМПЭ + n вес% Ф-4». Видно, что они снижаются по мере увеличения содержания флуралита.

Исходя из этих соображений, оптимальным содержанием указанного наполнителя следует выбрать 5 вес. %. Коэффициент трения также минимален при указанной степени наполнения флуралитом (табл. 1).

Таблица 1
Механические характеристики СВМПЭ и компози-
тов “СВМПЭ + n вес.% Ф-4”
Table 1. Mechanical properties of UHMWPE and com-
posites “UHMWPE + n wt. % fluorite”

Наполнитель Ф-4, вес.%,	ρ , г/см ³	Твердость Шор D	Модуль упругости E, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{в}$, МПа	Удлинение ϵ , %	Коеф.тр. $f_{тр}$
0	0,93	57,5 ±0,1	711 ±40	22,1 ±0,4	42,9 ±3,1	485 ±28	0,102
5	0,95	54,2 ±0,3	474 ±22	20,3 ±0,2	33,9 ±2	422 ±41	0,077
10	0,98	54,4 ±0,3	372 ±43	19,4 ±0,6	31,7 ±3,8	397 ±48	0,085
20	1,01	55,6 ±0,6	306 ±29	17,1 ±0,9	22,2 ±1,5	267 ±29	0,081

При исследовании надмолекулярной структуры композитов, наполненных флуоритом, было показано, что при его содержании 5 вес. % сферолитный характер структуры композита сохраняется. При этом в силу мелкодисперсной природы наполнителя удается равномерно распределить его в СВМПЭ–матрице (рис. 1).

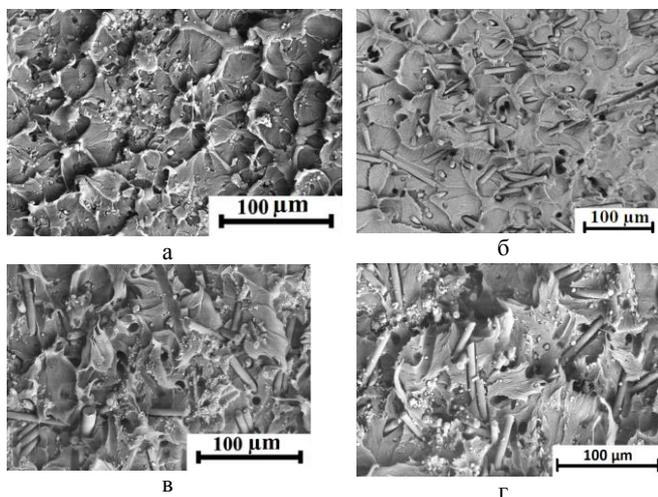


Рис. 1. РЭМ-изображения надмолекулярной структуры композитов “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4” (а), “СВМПЭ + 10 вес. % КУВ” (б), “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ” (в), “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ + 10% HDPE-g-SMA” (г)
 Fig. 1. SEM micrographs of permolecular structure of composites “UHMWPE + 5 wt. % fl.” (a), “UHMWPE + 10 wt. % CF” (б), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % CF” (в), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % HDPE + 10 % HDPE-g-SMA” (г)

Тем не менее, наличие мелкодисперсных частиц Ф-4, имеющего температуру плавления, значительно превосходящую температуру, ис-

пользованную при горячем прессовании СВМПЭ, сопровождается уменьшением до нескольких раз характерного размера сферолитов (рис. 1 а).

На рис. 2 а показаны результаты испытаний на изнашивание композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием флуорита в условиях различных нагрузок и скоростей скольжения. Видно, что при умеренной нагрузке $P = 60$ Н и скоростях $V = 0,3$ м/с и $V = 0,5$ м/с ($P \cdot V = 16$ и 30 Н·м/с) достаточно введения 5 вес. % флуорита для обеспечения минимального значения износа композиции (снижение составляет два раза по сравнению с исходным СВМПЭ: $\sim 0,5$ мм³/ч).

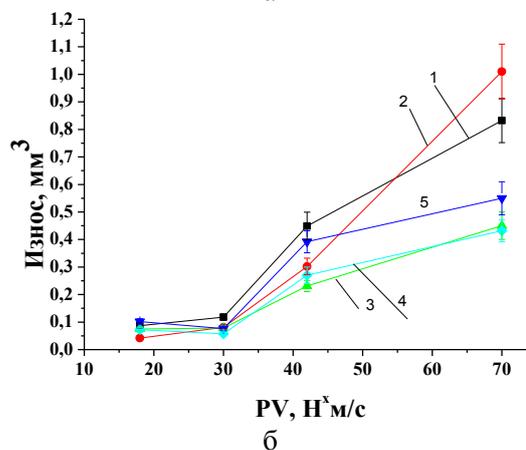
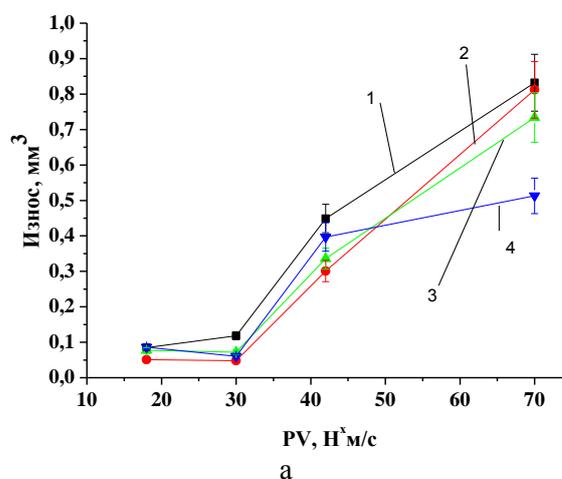


Рис. 2. Величина объемного износа (мм³) в течение 1 ч после трибоиспытаний: (а) СВМПЭ (1), “СВМПЭ+5 вес. % Ф-4” (2), “СВМПЭ+10 вес. % Ф-4” (3), “СВМПЭ+20 вес. % Ф-4” (4); (б) СВМПЭ (1), “СВМПЭ+5 вес. % Ф-4+5 вес. % КУВ” (2), “СВМПЭ+5 вес. % Ф-4+10 вес. % КУВ” (3), “СВМПЭ+5 вес. % Ф-4+20 вес. % КУВ” (4), “СВМПЭ+5 вес. % Ф-4+10 вес. % КУВ+10 % HDPE-g-SMA” (5)

Fig. 2. Volumetric wear in mm³ /h measured after tribotesting: (a) UHMWPE (1), “UHMWPE + 5 wt. % fl.” (2), “UHMWPE + 10 wt. % fl.” (3), “UHMWPE + 20 wt. % fl.” (4); (b) UHMWPE (1), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 5 wt. % CF” (2), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % CF” (3), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 20 wt. % CF” (4), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % HDPE + 10 % HDPE-g-SMA” (5)

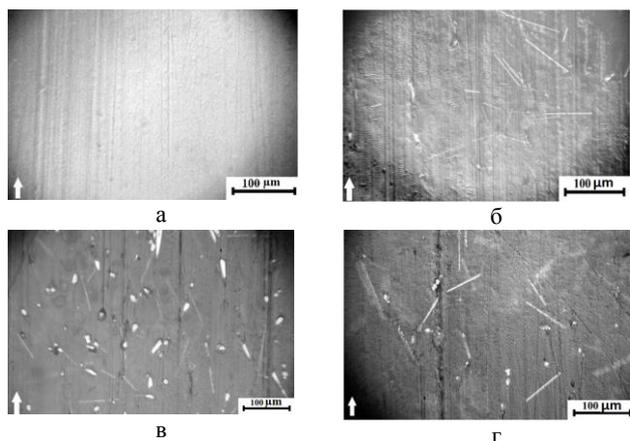


Рис. 3. Оптические изображения поверхностей трения композитов “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4” (а), “СВМПЭ + 10 вес. % КУВ” (б), “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ” (в), “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ + 10 вес. % HDPE-g-SMA” (г)

Fig. 3. Optical images of wear track surfaces for the composites “UHMWPE + 5 wt. % fl.” (a), “UHMWPE + 10 wt. % CF” (б), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % CF” (в), “UHMWPE + 5 wt. % fl. + 10 wt. % HDPE + 10 wt. % HDPE-g-SMA” (г)

При этом поверхность трения такого композита выглядит более гладкой (рис. 3 а). В наиболее жестких условиях испытаний ($P = 140$ Н и $V = 0,5$ м/с) введение лишь 20 вес % флуоралита

обеспечивает двукратное снижение износа, однако при этом механические свойства значительно снижаются (табл. 1). По этой причине только трехкомпонентные смеси могут обеспечить достижение необходимого уровня прочности и износостойкости композитов на матрице СВМПЭ, когда армирующие короткие углеродные волокна способны придать прочность, а микрочастицы флуоралита – износостойкость [8-12].

Далее исследовали механические и триботехнические свойства трехкомпонентных композиций на основе СВМПЭ с модифицированной за счет введения привитого малеиновым ангидридом полиэтилена высокой плотности (компатибилизатор) матрицей “СВМПЭ + 10 вес. % HDPE-g-SMA” [13]. Содержание (оптимальное количество) флуоралита было определено выше (5 вес. %), в то время как варьировали количество углеродных микроволокон (в диапазоне 5–20 вес. %).

В табл. 2 приведены триботехнические и механические свойства трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием КУВ.

Таблица 2

Механические характеристики СВМПЭ и композитов СВМПЭ + 5 вес. % Ф + n вес. % КУВ
Table 2. Mechanical characteristics of neat UHMWPE and composites “UHMWPE + 5 wt. % fl. + n wt. % CF”

Содержание наполнителя, вес. %	ρ , г/см ³	Твердость по Шору D	Модуль упругости E, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Удл. до разруш., ϵ , %	Коэфф. трения, $f_{тр}$
5%Ф+5% КУВ	0,99	57,2±0,7	750±59	20,8±1	35±4	405±26	0,083
5 % Ф +10 % КУВ	1,01	58,9±1,1	887±50	21±2,3	34±3	403±30	0,086
5 % Ф +20 % КУВ	1,06	61,6±0,8	1253±101	25,7±0,5	27,5±0,9	287±23	0,090
5 % Ф +10 % КУВ +10% HDPE-g-SMA	1,01	60,3±0,6	698±54	23,9±0,5	29,2±0,6	360±16	0,096

Из табл. 2 следует, что по мере увеличения содержания волокон возрастают все прочностные характеристики композитов (плотность, твердость, модуль упругости, предел текучести). При этом пластичность остается высокой вплоть до степени наполнения 20 вес. %. Рис. 1 в и г иллюстрируют надмолекулярную структуру трехкомпонентных композитов “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + +10 вес. % УВ” и компатибилизированной матрицы “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ +

+ 10 вес. % HDPE-g-SMA”. Видно, что сферолитная структура композита сохраняется, флуоралит и углеродное волокно достаточно равномерно распределены по объему образца. Для сравнения на рис. 1 б приведена надмолекулярная структура двухкомпонентного композита “СВМПЭ + 10 вес. % КУВ”, которая указывает на подобие надмолекулярных структур двух- и трехкомпонентного композитов. Также следует отметить факт снижения характерного размера сферолитов при одновременном вве-

дении обоих наполнителей. При дальнейшем увеличении степени наполнения композиции короткими углеродными волокнами надмолекулярная структура перестает носить сферолитный характер, представляя скорее механическую смесь компонентов. Согласно данным РЭМ, адгезия между углеволокном и матрицей отсутствует.

На рис. 2 б приведены результаты трибо-технических испытаний композитов “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + n вес. % КУВ” в различных условиях трибонагружения (60 Н×0,3 м/с, 60 Н×0,5 м/с, 140 Н×0,3 м/с, 140 Н×0,5 м/с). Из рис. 2 б следует, что при умеренной нагрузке $P = 60$ Н и обеих скоростях скольжения $V = 0,3$ и $0,5$ м/с трехкомпонентные смеси, содержащие 5, 10 и 20 вес. % углеволокна показывают интенсивность изнашивания, близкую к таковой для двухкомпонентной смеси “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4”, а также композита на модифицированной (компатибилизированной) матрице “СВМПЭ + 10 вес. % HDPE-g-SMA”. Это подтверждает положительную роль флуоралита как твердой смазки в трехкомпонентной композиции. В наиболее жестких условиях трибоиспытаний ($P = 140$ Н и $V = 0,5$ м/с) интенсивность износа возрастает. Причиной этого, по мнению авторов, является неспособность флуоралита обеспечить формирование и длительное сохранение постоянной равномерной пленки переноса на контртеле [14-16]. Подтверждением «жесткости» условий трибоиспытаний является температура на поверхности контртела, измеренная сразу после окончания испытаний (табл. 3). Видно что при соотношении $P \cdot V = 70$ Н·м/с температура значительно повышается. Иллюстрацией выше сказанного являются данные, приведенные на рис. 3, где показаны фотографии поверхности изнашивания образцов двух- (а и б) и трехкомпонентных (в и г) смесей при умеренных ($P \cdot V = 30$ Н·м/с) условиях трибонагружения. На рис. 3 г приведены оптические фотографии, характеризующие морфологию поверхностей изнашивания для композита с модифицированной за счет введения привитого полиэтилена высокой плотности матрицей “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ + 10 вес. % HDPE-g-SMA” [17-20]. Целью добавления привитого полимера являлось обеспечение совместимости компонентов смеси (компатибилизация).

Из рис. 3 следует, что при наполнении композита КУВ в количестве до 10 вес. % и мелкодисперсным флуоралитом в содержании до 5 вес. % обеспечивается формирование равномер-

ной (однородной) пленки переноса на контртеле. В результате поверхность трения становится более гладкой (рис. 3 а и г), чем заметно и выгодно отличается от двухкомпонентного композита (рис. 3 б) и композита на компатибилизированной (более мягкой за счет введения привитого ПЭВП) СВМПЭ–матрице. Кроме того, короткие углеродные волокна не только способствуют повышению прочностных характеристик трехкомпонентного композита, но принимают на себя действие сжимающей (P) и сдвигающей (V) нагрузки от контртела, защищая поверхность трибосопряжения от интенсивного изнашивания.

Таблица 3

Температура контртела в процессе изнашивания СВМПЭ и композитов на его основе
Table 3. Counterface temperature during the wear of UHMWPE and its composites

Наполнитель, вес. %	Режим испытания			
	60 Н×0,3 м/с	60 Н×0,5 м/с	140 Н×0,3 м/с	140 Н×0,5 м/с
	Температура контртела, °С			
-	31,4	34,9	37,2	61
5 %Ф-4	26,3	34	33,6	58,7
10 % КУВ	28,6	33,6	40,1	51,8
5 % Ф-4 +10 % КУВ	30,4	32,4	35,7	53,1
5 % Ф-4 +10 % КУВ +10 % HDPE- g-SMA	29,6	30,8	35,4	54,3

При высокой степени наполнения короткими углеродными волокнами (20 вес. %) механические характеристики трехкомпонентного композита возрастают (табл. 2), однако износостойкость снижается. По мнению авторов это связано с тем, что разрушенные фрагменты твердых углеродных волокон, отделяющиеся из зоны трибоконтакта, начинают играть роль абразива. Это, в том числе, способствует удалению пленки переноса политетрафторэтилена с поверхности контртела. В пользу данного предположения свидетельствуют и изменения коэффициента трения (табл. 2). Данный вывод согласуется с фактом постепенного повышения коэффициента трения с увеличением содержания углеволокна.

ВЫВОДЫ

Одновременное введение двух микронаполнителей (твердосмазочного и армирующего) в сверхвысокомолекулярную ПЭ-матрицу позволяет одновременно обеспечить повышение механических характеристик (модуль упругости, предел текучести, твердость) и износостойкости трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ в различных условиях трибонагружения.

При умеренной скорости и нагрузке ($P = 60 \text{ Н} \times V = 0,3 \text{ м/с}$) оптимальным составом композита для антифрикционных приложений следует считать “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 5 вес. % КУВ”, поскольку сформированная структура и отклик поверхности трения на триботехническое нагружение (за счет формирования пленки переноса) позволяют повысить сопротивление изнашиванию вдвое. В наиболее жестких условиях трибоиспытаний ($P = 140 \text{ Н} \times V = 0,5 \text{ м/с}$) двукратное увели-

чение износостойкости показывает композит “СВМПЭ + 5 вес. % Ф-4 + 10 вес. % КУВ”. Это обусловлено армирующим действием коротких углеродных микроволокон, которые в условиях повышенных температур, вызванных фрикционным нагревом, стимулирующих подплавление и пластификацию поверхностного слоя трибоконтакта, позволяют лучше защитить поверхность трения от комбинированного воздействия сжимающих и сдвигающих нагрузок, передаваемых от стального контртела.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг» Минобрнауки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

Статья издана при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-03-20012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zoo V.S., An J.-W., Lim D.-Ph., Lim D.-S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *Tribolog. Lett.* 2004. V. 16. N 4. P. 305-309.
2. Wei Z., Zhao Ya-Pu, Ruan S.L., Gao P. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites. *Surf. Interface Anal.* 2006. V. 38. P. 883–886.
3. Myshkin N.K., Kovalev A.V. Adhesion and Friction of Polymers of Polymer Tribology. Eds: S.K. Sinha, B.J. Briscoe. Imperial College Press. 2009. P. 3-32.
4. Гоголева О.В., Охлопкова А.А., Петрова П.Н. Износостойкие композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для эксплуатации в экстремальных условиях. *Материаловедение*. 2011. № 9. С. 10-13.
5. Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V. Carbon nanofibre-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene for tribological applications. *J. Appl. Polymer Sci.* 2007. V. 104. P. 4173-4181.
6. Panin S.V., Kornienko L.A., Sergeev V.P., Sonjaitham N., Tchaikina M.V. Wear-Resistant Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene-Based Nano- and Microcomposites for Implants. *J. Nanotechnol.* 2012. Article ID 729756. 7 p.
7. Юдин А.С., Буяев Д.И., Краснов А.П., Сачек Б.Я., Афоничева О.В., Баженова В.Б. Дисперсные наполнители в трибологических полимерных волокноармированных материалах (поисковое исследование). *Вопр. материаловед.* 2012. Т. 72. № 4. P. 231-239.
8. 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.
9. Panin S.V., Shilko S.V., Kornienko L.A., Chernous D.A., Aleksenko V.O. Biomechanical properties of dispersed ar-

REFERENCES

1. Zoo V.S., An J.-W., Lim D.-Ph., Lim D.-S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *Tribolog. Lett.* 2004. V. 16. N 4. P. 305-309.
2. Wei Z., Zhao Ya-Pu, Ruan S.L., Gao P. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites. *Surf. Interface Anal.* 2006. V. 38. P. 883–886.
3. Myshkin N.K., Kovalev A.V. Adhesion and Friction of Polymers of Polymer Tribology. Eds: S.K. Sinha, B.J. Briscoe. Imperial College Press. 2009. P. 3-32.
4. Gogoleva O.V., Okhlopova A.A., Petrova P.N. Wear-resistant composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene and basalt fibers. *J. Friction and Wear.* 2015. V. 36. N 4. P. 301–305. DOI: 10.3103/S1068366615040054.
5. Galetz M.C., Blar T., Ruckdaschel H., Sandler K.W., Alstadt V. Carbon nanofibre-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene for tribological applications. *J. Appl. Polymer Sci.* 2007. V. 104. P. 4173-4181.
6. Panin S.V., Kornienko L.A., Sergeev V.P., Sonjaitham N., Tchaikina M.V. Wear-Resistant Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene-Based Nano- and Microcomposites for Implants. *J. Nanotechnol.* 2012. Article ID 729756. 7 p.
7. Yudin A.S., Buyayev D.I., Krasnov A.P., Sachek B.Ya., Afonicheva O.V., Bazhenova V.B. Disperse fillers in tribological fiber-reinforced polymer materials. Exploratory research. *Vopr. Materialoved.* 2012. V 72. N 4. P. 231–239 (in Russian).
8. Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shil'ko S.V. Comparison on efficiency of carbon nano- and microfibers in formation physical-mechanical and tribotechnical properties of polymer composites based on highmolecular weight matrix. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 9. P. 99–105 (in Russian).
9. Panin S.V., Shilko S.V., Kornienko L.A., Chernous D.A., Aleksenko V.O. Biomechanical properties of dispersed ar-

- ticle reinforced polymer composites on ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE). *MOJ App. Bio. Biomech.* 2017. 1(5). P. 00030.
10. Панин С.В., Корниенко Л.А., Нгуен Суан Т., Иванова Л.Р., Корчагин М.А., Шилько С.В., Плескачевский Ю.М. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ-ПТФЭ: механические и триботехнические свойства матрицы. *Трение и износ.* 2015. Т. 36. № 3. С. 244-251.
 11. 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.
 12. **Briscoe B.J., Sinha S.K.** Tribological applications of polymers and composites: Past, present and future prospects. Elsevier. 2008. P. 1–14.
 13. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Influence of nano- and microfillers on the mechanical and tribotechnical properties of «UHMWPE-PTFE» composites. *Key Eng. Mater.* 2016. V. 712. P. 161-165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.161.
 14. Панин С.В., Донцов Ю.В. Экструдруемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). *Сборка в машиностр., приборостр.* 2018. Т. 19. № 1. С. 16–23.
 15. **Kornienko L.A., Panin S.V.** Antifriction nanocomposites based on the chemically modified ultra-high molecular weight polyethylene. In: *Characterization of Nanocomposites: Technology and Industrial Applications.* Ed. by F. Abdi, M. Garg. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 2017. 486 p.
 16. **Kurtz S.M.** The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement. Academic press. 2009. 379 p.
 17. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Extrudable composites based on UHMWPE: Prospects of application in additive technologies. *Nanosciences and Technology.* 2017. V. 8. Iss. 2. P. 85-94.
 18. **Lee E.M., Oh Y.S., Ha H.S., Kim B.K.** Rheological properties of UHMWPE/iPP blends. *Polym. Adv. Technol.* 2009. 20. P. 1121-1126.
 19. **Liu G., Xiang M., Li X.** A Study on Sliding Wear of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene/Polypropylene Blends. *Polymer Eng. Sci.* 2004. 44 (1). P. 197-208.
 20. **Chang N., Naik A.M., Khaira H.K.** Development of UHMWPE Modified PP/PET Blends and Their Mechanical and Abrasive Wear Behavior. *Polymer Composit.* 2007. 5. P. 267-272.
 10. **Panin S.V., Kornienko L.A., Nguen Suan T., Ivanova L.R., Korchagin M.A., Shil'ko S.V., Pleskachevskii Yu.M.** Wear resistance of composites based on hybrid UHMWPE–PTFE matrix: Mechanical and tribotechnical properties of the matrix. *J. Friction and Wear.* 2015. V. 36. N 3. P. 249-256.
 11. **Krasnov A.P., Aderikha V.N., Afonicheva O.V., Mit V.A., Tikhonov N.N., Vasilkov A.Yu., Said-Galiev E.E., Naumkin A.V., Nikolaev A.Yu.** Categorization system of nanofillers to polymer composites. *J. Friction and Wear.* 2010. V. 31. N 1. P. 68-80.
 12. **Briscoe B.J., Sinha S.K.** Tribological applications of polymers and composites: Past, present and future prospects. Elsevier. 2008. P. 1–14.
 13. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Influence of nano- and microfillers on the mechanical and tribotechnical properties of «UHMWPE-PTFE» composites. *Key Eng. Mater.* 2016. V. 712. P. 161-165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.161.
 14. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexsenko V.O., Buslovich D.G., Dontsov Yu.V.** Extrudable polymer-polymeric composites of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Sborka v Mashinostr., Priborostr.* 2018. V. 19. N 1. P. 16–23 (in Russian).
 15. **Kornienko L.A., Panin S.V.** Antifriction nanocomposites based on the chemically modified ultra-high molecular weight polyethylene. In: *Characterization of Nanocomposites: Technology and Industrial Applications.* Ed. by F. Abdi, M. Garg. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 2017. 486 p.
 16. **Kurtz S.M.** The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement. Academic press. 2009. 379 p.
 17. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Extrudable composites based on UHMWPE: Prospects of application in additive technologies. *Nanosciences and Technology.* 2017. V. 8. Iss. 2. P. 85-94.
 18. **Lee E.M., Oh Y.S., Ha H.S., Kim B.K.** Rheological properties of UHMWPE/iPP blends. *Polym. Adv. Technol.* 2009. 20. P. 1121-1126.
 19. **Liu G., Xiang M., Li X.** A Study on Sliding Wear of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene/Polypropylene Blends. *Polymer Eng. Sci.* 2004. 44 (1). P. 197-208.
 20. **Chang N., Naik A.M., Khaira H.K.** Development of UHMWPE Modified PP/PET Blends and Their Mechanical and Abrasive Wear Behavior. *Polymer Composit.* 2007. 5. P. 267-272.

Поступила в редакцию 15.06.2018
Принята к опубликованию 10.10.2018

Received 15.06.2018
Accepted 10.10.2018