

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 678.073:661.481

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО СТЕАРАТОМ КАЛЬЦИЯ

С. В. ПАНИН^{1,2+}, Л. А. КОРНИЕНКО¹, Т. НГУЕН СУАН², Л. Р. ИВАНОВА¹, М. А. ПОЛТАРАНИН¹,
С. В. ШИЛЬКО³, Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ³

¹ ГНУ «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», пр. Академический, 2/4, 634021 г. Томск, Россия.

² НИ «Томский политехнический университет», пр. Ленина, 30, 634050 г. Томск, Россия.

³ ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси», ул. Кирова, 32а, 246050 г. Гомель, Беларусь.

С целью создания материалов для эндопротезов исследованы триботехнические характеристики сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненного стеаратом кальция $C_{36}H_{70}CaO_4$, в условиях сухого трения, граничной смазки и абразивного изнашивания. Показано, что интенсивность изнашивания композитов «СВМПЭ–стеарат кальция» в условиях сухого трения скольжения снижается более, чем в четыре раза в сравнении с чистым СВМПЭ. При этом механические характеристики изменяются незначительно. В абразивной среде интенсивность изнашивания указанных композитов возрастает с увеличением содержания наполнителя. Определено оптимальное содержание наполнителя с точки зрения износостойкости.

Введение

Антифрикционные полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются для изготовления узлов трения технического и медицинского назначения, определяя их надежность и долговечность [1–3]. В частности, использование микро- и нанокомпозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) позволяет резко повысить сопротивление изнашиванию металлополимерных трибосопряжений [4–10]. В высоконагруженных узлах трения технического назначения, когда жидкие либо пластичные смазки непригодны по условиям эксплуатации, формируют композитные твердосмазочные покрытия наполнением полимерной матрицы частицами графита и дисульфида молибдена. При введении в СВМПЭ-матрицу твердой смазки в виде порошка политетрафторэтилена можно расширить номенклатуру биосовместимых материалов для изготовления имплантатов, например, эндопротезов [9, 10].

Важно отметить, что зачастую требуется обеспечить нормальное функционирование металлополимерных узлов трения в существенно разли-

чающихся (например, изменяющихся в процессе эксплуатации) условиях (абразивный износ, сухое трение скольжения, трение в режиме граничной смазки). Не случайно, эффективность применения того или иного ПКМ в триботехнике выражается в реализации спонтанного перехода в благоприятный режим трения в результате надлежащей активации компонентов, выполняющих функцию антифрикционных (это может быть матрица, наполнитель или вторичные структуры). Для направленного поиска составов, обеспечивающих указанные свойства ПКМ в зависимости от условий функционирования сопряжений, очевидно, следует анализировать механизмы изнашивания композитов на основе общих принципов термодинамики [11]. Кроме того, актуально расчетное прогнозирование фрикционно-механических характеристик композитов в зависимости от объемного содержания и свойств компонентов [12], а также критериальная оптимизация напряженно-деформированного состояния и эксплуатационных показателей сопряжений многоуровневыми (микро-, мезо- и макромасштабными) методами [11, 13].

Вышесказанное, в особенности, относится к обеспечению приемлемых антифрикционных и

механических характеристик эндопротезов при работе в условиях граничной смазки (нормальный режим), сухого трения скольжения (при дефиците природной смазки в виде синовиальной жидкости), абразивного изнашивания (при интенсивной кальцификации или появлении в контакте частиц изнашивания металлического контртела). Уникальные антифрикционные свойства суставов во многом обусловлены строением контактного слоя – суставного хряща, включающего твердую фазу в виде хрящевого матрикса и жидкую фазу – синовиальную жидкость (синовию). Для выполнения жесткого ограничения на биосовместимость при создании аналога суставного хряща на основе СВМПЭ, выступающего в качестве заменителя хрящевого матрикса, в качестве имитатора синовиин целесообразно рассмотреть стеарат кальция СК (стеариновоокислый кальций $C_{36}H_{70}CaO_4$), представляющий собой смесь кальциевых солей стеариновой и синтетических жирных кислот. Данное соединение используется при переработке пластмасс в качестве пластификатора, антиадгезива и технологической смазки [14], а также, благодаря его нетоксичности и биосовместимости, допущен к применению в фармацевтике в качестве эмульгатора, смазочного материала и загустителя [14, 15]. Публикации по использованию стеарата кальция для создания материалов для эндопротезов отсутствуют.

Цель работы – экспериментальное исследование триботехнических свойств композитов «СВМПЭ–стеарат кальция» и проведение сравнительного анализа эффективности использования различных твердосмазочных наполнителей, включая стеарат кальция, MoS_2 , графит и фторопласт, для получения антифрикционных ПКМ на основе СВМПЭ, работающих в условиях сухого трения, абразивного изнашивания и граничной смазки.

Материалы и методы проведения исследования

В работе использовали СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн и размером частиц 5–15 мкм, стеарат кальция СК ($C_{36}H_{70}CaO_4$, размер частиц 1–7 мкм). Образцы полимерных композитов получали горячим прессованием при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 1,5 °С/мин. Перемешивание порошков полимер-

ной смеси СВМПЭ и наполнителей СК проводили в планетарной шаровой мельнице MP/0,5*4 с предварительным диспергированием компонентов в ультразвуковой ванне.

Износостойкость материалов в режиме сухого трения определяли по схеме «вал–колодка» при нагрузке на образец 68,8 Н и скорости вращения вала 100 мин⁻¹ по стандарту ASTM G99 на машине трения СМТ-1 (скорость скольжения 0,32 м/с). Размер образцов $B \times Ш \times D = 7 \times 7 \times 10$ мм. Диаметр контртела из стали ШХ15 составлял 62 мм. Поверхности трения образцов исследовали на оптическом профилометре ZygoNewView 6200. Площадь дорожки трения определяли с помощью программного обеспечения «RhinoCeros 3.0» путем ручного выделения контура поверхности истирания (дорожки трения) и последующего автоматического расчета ее площади.

Испытания на абразивный износ проводили на трибометре для испытаний резины МИ-2. Сопротивление изнашиванию оценивали 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 (ГОСТ 426). Объемный абразивный износ определяли взвешиванием образцов с последующим вычислением потери массы через каждые 5 мин. Методика тестирования соответствовала требованиям ASTM G99 и DIN 50324. Триботехнические характеристики оценивали усреднением по четырем образцам.

Структурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа LEOEVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте. Механические характеристики определяли на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки при количестве образцов одного типа не менее 5 (ГОСТ 11262–80).

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведены основные физико-механические характеристики СВМПЭ и композитов СВМПЭ + *n* мас.% СК. Из нее следует, что при наполнении СВМПЭ стеаратом кальция наблюдается незначительное возрастание плотно-

Физико-механические характеристики СВМПЭ–СК

Содержание наполнителя СК, мас. %	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по Шору D	Предел прочности σ_b , МПа	Предельное относительное удлинение ϵ , %	Кристалличность χ , %	Коэффициент трения <i>f</i>	
						с/трение	вода
0	0,936	59,5±0,6	32,3±0,9	485±23,6	56,5	0,120	0,079
1	0,935	58,9±0,7	34,7±1,0	484±25,0	44,2	0,099	0,072
3	0,937	58,3±0,5	35,0±0,9	461±24,3	42,5	0,100	0,075
5	0,940	57,5±0,6	35,1±0,9	411±19,5	41,0	0,111	0,095
10	0,941	57,3±0,5	28,8±1,0	402±15,6	38,1	0,123	0,105
20	0,955	56,4±0,6	28,8±1,1	366±17,9	37,5	0,135	0,107

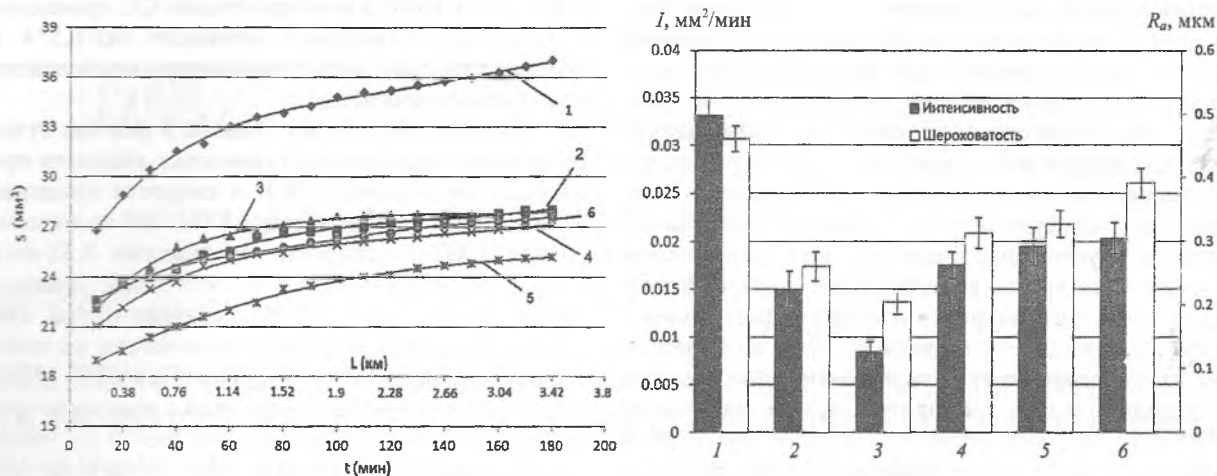


Рис. 1. Кинетические кривые (а), интенсивность изнашивания I и шероховатость поверхности трения R_a (б) чистого СВМПЭ (1) и композитов на его основе: СВМПЭ + 1 мас.% СК (2); СВМПЭ + 3 мас.% СК (3); СВМПЭ + 5 мас.% СК (4); СВМПЭ + 10 мас.% СК (5); СВМПЭ + 20 мас.% СК (6) на стадии установившегося износа при скольжении в режиме сухого трения

сти и уменьшение твердости по Шору D . Более заметно уменьшаются показатели кристалличности и относительного удлинения при разрушении. Предел прочности вначале растет (до 3–5 мас.% наполнителя), а при дальнейшем росте концентрации стеарата кальция снижается (коэффициент трения при этом возрастает).

Далее исследовалась износостойкость разрабатываемых композитов в различных режимах

трения.

Сухое трение скольжения. Кинетические кривые изнашивания образцов СВМПЭ и композитов СВМПЭ + n мас.% СК (рис. 1, а) показывают, что интенсивность изнашивания последних значительно меньше, чем для чистого (ненаполненного) СВМПЭ. На рис. 1, б приведена диаграмма интенсивностей износа указанных ПКМ на стадии установившегося изнашивания (I , мм²/мин). Из

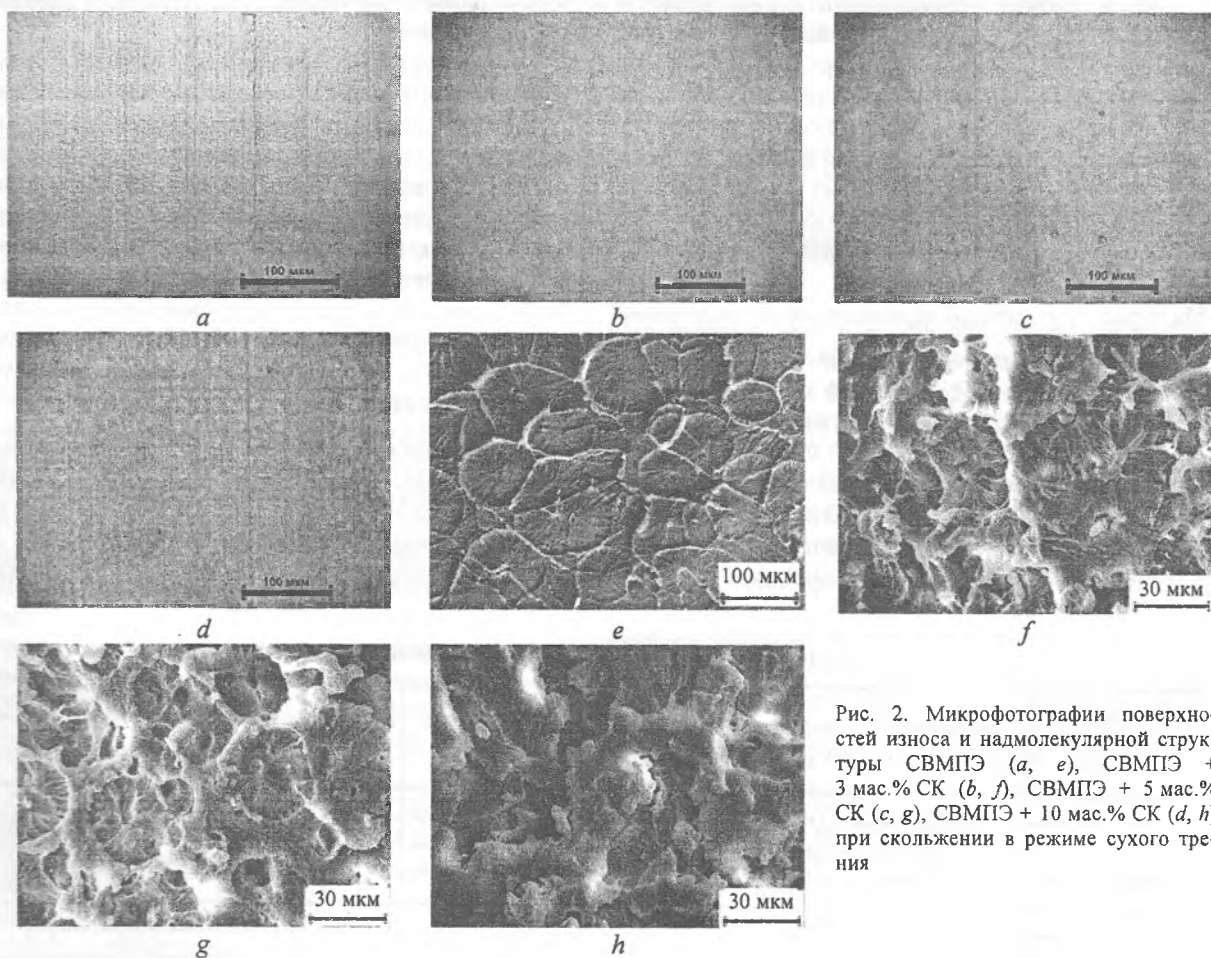


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей износа и надмолекулярной структуры СВМПЭ (а, е), СВМПЭ + 3 мас.% СК (б, ф), СВМПЭ + 5 мас.% СК (с, г), СВМПЭ + 10 мас.% СК (д, h) при скольжении в режиме сухого трения

рис. 1, *b* следует, что СВМПЭ + 3 мас. % СК показал минимальную интенсивность изнашивания (в 4 раза меньше по сравнению с чистым СВМПЭ) и шероховатость поверхности трения (рис. 2) при сохранении деформационно-прочностных характеристик (табл.).

Дальнейшее увеличение содержания стеарата кальция до 20 мас.% неэффективно в плане повышения износостойкости, хотя сопротивление изнашиванию композитов с таким уровнем наполнения остается существенно более высоким в сравнении с чистым СВМПЭ.

Зависимость шероховатости поверхности износа R_a от содержания наполнителя аналогична зависимости для интенсивности изнашивания I всех исследованных ПКМ (рис. 1, *b*), так и изменению коэффициента трения (табл.).

Для выяснения взаимосвязи между характером износа при сухом трении скольжения, сформировавшейся структурой и количеством стеарата кальция на стадии установившегося износа, исследованы поверхности трения и надмолекулярная структура композитов СВМПЭ + n мас.% СК (рис. 2), из которого следует, что наполнение СВМПЭ стеаратом кальция приводит к постепенному изменению (уменьшению однородности) надмолекулярной структуры, обусловленному подавлением роста сферолитов при кристаллизации частицами наполнителя. При высоком содержании наполнителя сферолитная структура практически не формируется (рис. 2, *h*). Из рисунков также видно, что адгезия между наполнителем и матрицей отсутствует.

Микроборозды, наблюдаемые на поверхности трения чистого СВМПЭ, исчезают в композите с 3 мас.% СК, и вновь появляются при дальнейшем увеличении содержания наполнителя (рис. 2, *a-d*).

ИК-спектры чистого и наполненного стеаратом кальция СВМПЭ (рис. 3) показывают повышение

интенсивности линий C–H (750 см^{-1}) и C=C (1640 см^{-1}) в композициях СВМПЭ–СК, что указывает на появление в полимере дополнительных химических связей, обеспечивающих повышение прочности σ_B (табл.) [16]. При этом твердость по Шору уменьшается на единицу за счет относительно мягкого наполнителя СК.

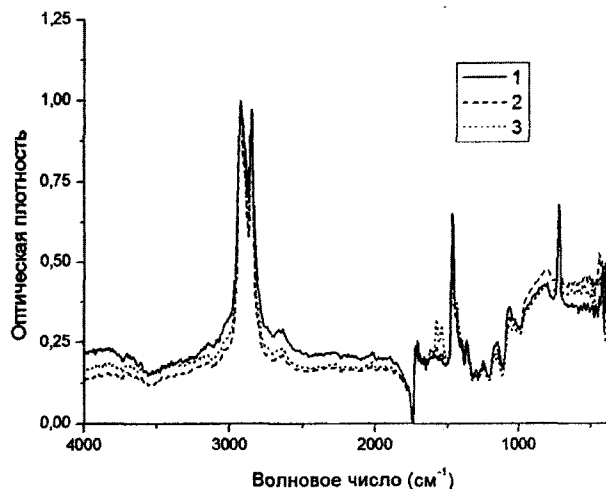


Рис. 3. ИК-спектры чистого СВМПЭ (1) и композитов на его основе СВМПЭ + 3 мас.% САК (2) и СВМПЭ + 10 мас.% СК (3)

Трение в условиях граничной смазки. Результаты испытаний на износ композитов в смазочной среде (дистиллированной воде) указывают на то, что кальций стеарат является твердой смазкой, как в условиях сухого трения, так и в среде дистиллированной воды. На рис. 4 приведены кинетические кривые (*a*), интенсивность изнашивания и шероховатость поверхности износа (*b*) СВМПЭ + n мас.% СК при наличии смазки. Следует, что при граничной смазке, во-первых, уменьшается интенсивность изнашивания чистого СВМПЭ и композитов СВМПЭ–СК. Во-вторых, интенсивность изнашивания композитов СВМПЭ–СК в среде дистиллированной воды ниже, чем чистого

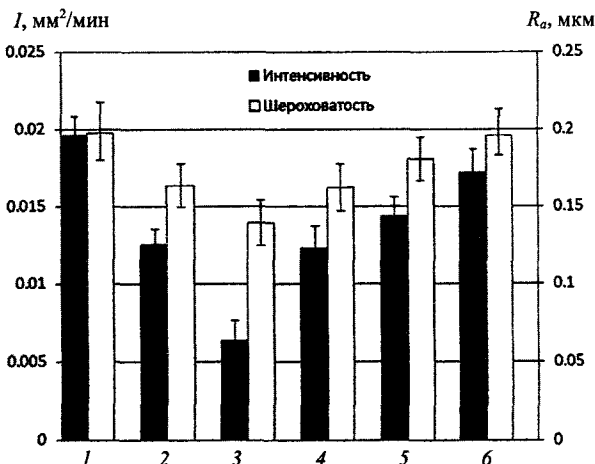
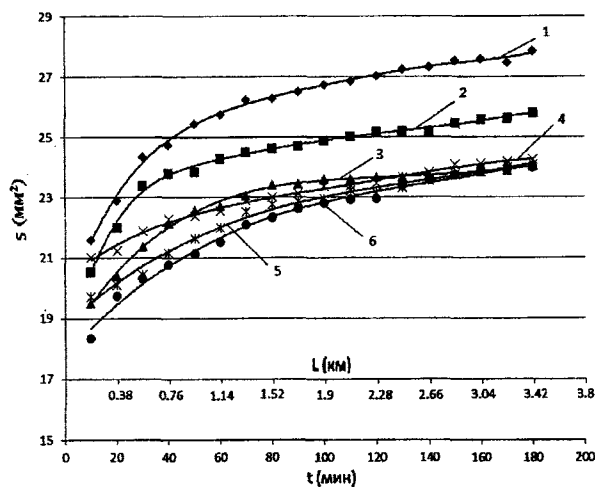


Рис. 4. Кинетические кривые (*a*), интенсивность изнашивания I и шероховатость поверхности дорожки трения R_a (*b*) чистого СВМПЭ (1) и композитов на его основе: СВМПЭ + 1 мас.% СК (2); СВМПЭ + 3 мас.% СК (3); СВМПЭ + 5 мас.% СК (4); СВМПЭ + 10 мас.% СК (5); СВМПЭ + 20 мас.% СК (6) в смазочной среде (дистиллированная вода)

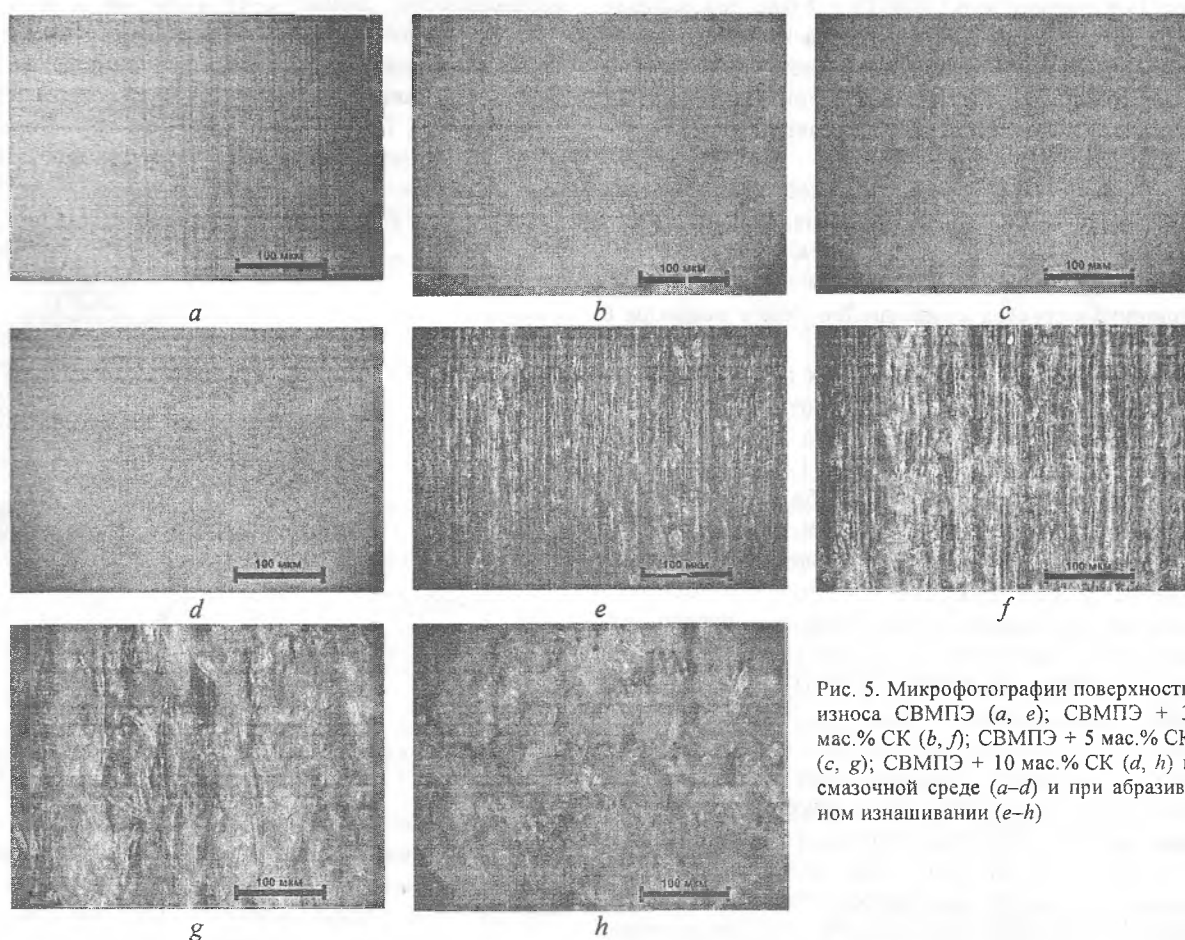


Рис. 5. Микрофотографии поверхности износа СВМПЭ (а, е); СВМПЭ + 3 мас.% СК (b, f); СВМПЭ + 5 мас.% СК (с, g); СВМПЭ + 10 мас.% СК (d, h) в смазочной среде (а-д) и при абразивном изнашивании (е-h)

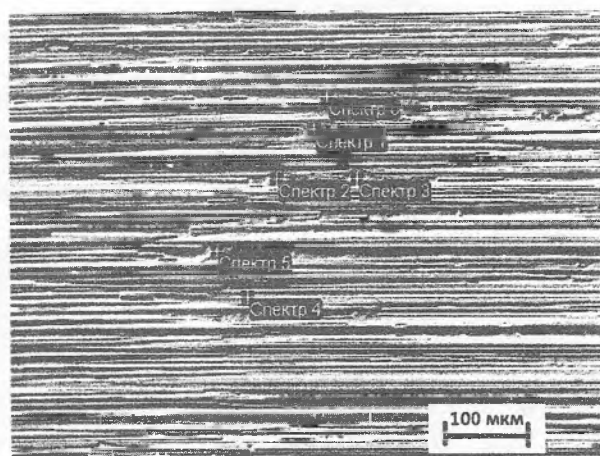
СВМПЭ в той же среде. Шероховатость поверхностей износа R_a композитов в смазочной среде также ниже, чем чистого СВМПЭ (рис. 4, б).

В смазочной среде зависимость коэффициента трения исследуемых композитов от содержания наполнителя СК аналогична таковой в условиях сухого трения скольжения (табл.).

На рис. 5, а-д показана поверхность износа СВМПЭ и композитов СВМПЭ-СК при наличии смазочной среды. Можно заметить, что для чистого СВМПЭ характерны тонкие «микробороздки» износа, тогда как в композитах они отсутствуют. Это свидетельствует о том, что стеарат кальция выполняет роль твердой смазки при сухом трении композитов на основе СВМПЭ, равноценной жидкой граничной смазке.

Вышесказанное подтверждается микроанализом поверхности контртела (рис. 6). Пленки переноса на контртеле не фиксируются, а повышенное содержание углерода на поверхности контртела свидетельствует о сглаживании ее шероховатости в результате заполнения впадин мягким стеаратом кальция.

Абразивное изнашивание. В работе проанализировано влияние стеарата кальция на сопротивление абразивному изнашиванию микрокомпозитов на основе СВМПЭ. На рис. 7 приведена диаграмма интенсивности абразивного изнашивания



а

Спектр	С, мас.%	Са, мас.%	Сг, мас.%	Fe, мас.%
Спектр 1	12,35	0,00	1,19	86,45
Спектр 2	18,89	0,00	1,59	79,52
Спектр 3	12,16	0,00	1,60	86,24
Спектр 4	9,87	0,00	1,32	88,80
Спектр 5	8,14	0,00	1,70	90,15
Спектр 6	27,69	0,08	1,09	71,14

б

Рис. 6. Микрофотография (а) и результаты микроанализа поверхности контртела после испытаний композита СВМПЭ + 20 мас.% СК (б) в режиме сухого трения

всех исследованных материалов при размере зерна абразива 240 (58,5 мкм). Следует, что интенсивность абразивного изнашивания при наполнении СВМПЭ стеаратом кальция возрастает, причем при большом содержании наполнителя (10–20 мас.%) абразивный износ возрастает многократно, в 13–17 раз (столбцы 5 и 6). На рис. 5, *e–h* приведены микрофотографии поверхности абразивного изнашивания СВМПЭ (рис. 5, *e*) и композитов СВМПЭ–СК (рис. 5, *f–h*). Видно, что частицы закрепленного абразива режут прежде всего мягкий наполнитель, определяющий низкую абразивную износостойкость композитов в целом. Во-вторых, стеарат кальция не способен «защитить» матрицу в силу несоизмеримости размеров частиц наполнителя и зерна абразива (1–7 мкм и 58,5 мкм соответственно).

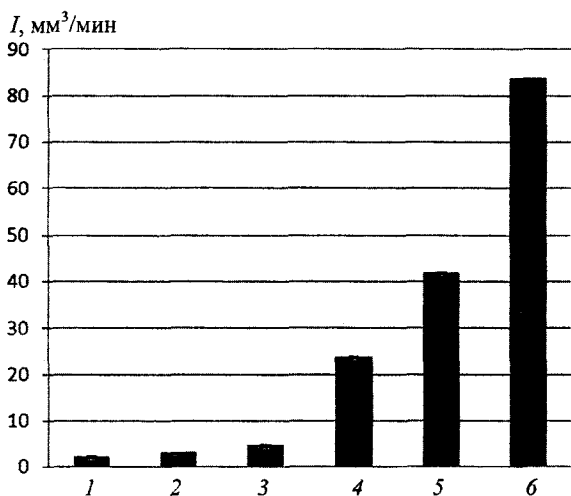


Рис. 7. Интенсивность изнашивания I СВМПЭ (1) и композитов на его основе: СВМПЭ + 1 мас.% СК (2); СВМПЭ + 3 мас.% СК (3); СВМПЭ + 5 мас.% СК (4); СВМПЭ + 10 мас.% СК (5); СВМПЭ + 20 мас.% СК (6) на стадии установившегося абразивного износа (Р 240)

Результаты исследования и их обсуждение

В работе проведен сравнительный анализ износостойкости композитов на основе СВМПЭ с твердосмазочными наполнителями (стеарат кальция, дисульфид молибдена, графит, фторопласт). С учетом предыдущих исследований авторов на рис. 8 приведены интенсивности изнашивания композитов на основе СВМПЭ с твердосмазочными наполнителями оптимального содержания [9, 13], из которого видно, что износостойкость композита СВМПЭ + 3 мас.% СК близка износостойкости СВМПЭ + 10 мас.% Ф4 и существенно выше, чем СВМПЭ + 3 мас.% С и СВМПЭ + 10 мас.% MoS₂. В исследовании [9] авторами показано, что дисульфид молибдена и графит, благодаря слоистой структуре, формируют на контртеле микрослой переноса высокой прочности, способствующий уменьшению коэффициента трения и интенсивности изнашивания. В [10] установлено, что наполнитель в виде фторопласта формирует пленку

переноса на контртеле, снижая коэффициент трения и выполняя роль твердой смазки при трении композитов СВМПЭ–ПТФЭ.

По критерию повышения износостойкости и сохранения механических характеристик стеарат кальция проявил себя, как наиболее эффективный микронаполнитель высокомолекулярной матрицы СВМПЭ, способствующий также снижению температуры поверхности трения (рис. 9). Таким образом, с учетом биосовместимости стеарата кальция, композиты СВМПЭ–СК (до 3 мас.% СК) могут быть использованы в медицине (в частности, для изготовления эндопротезов).

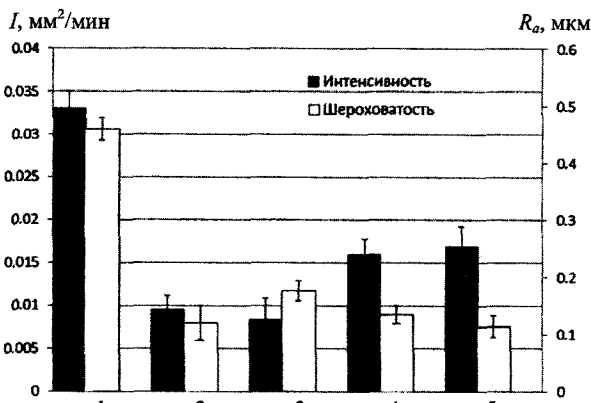


Рис. 8. Интенсивность изнашивания и шероховатость поверхностей износа СВМПЭ (1); СВМПЭ + 10 мас.% ПТФЭ (2); СВМПЭ + 3 мас.% СК (3); СВМПЭ + 3 мас.% С (4); СВМПЭ + 10 мас.% MoS₂ (5) на стадии установившегося износа при скольжении в режиме сухого трения

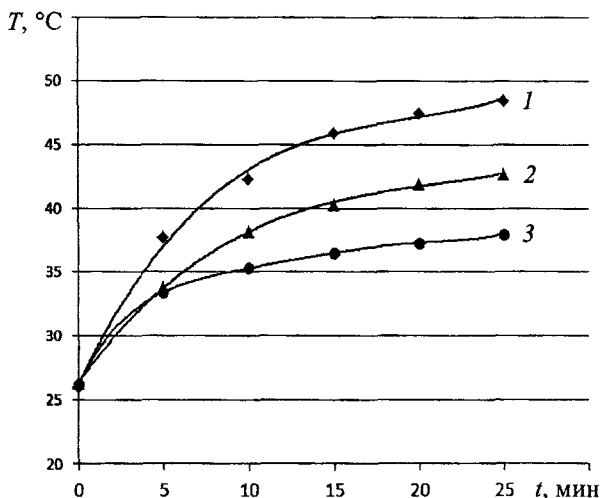


Рис. 9. Кинетические кривые изменения температуры поверхности трения образцов СВМПЭ (1) и композитов на его основе: СВМПЭ + 3 мас.% СК (2), СВМПЭ + 20 мас.% СК (3) при сухом трении скольжения

Но в условиях абразивного износа наблюдается резание не только мягкого наполнителя (СК), но и матричного материала (СВМПЭ); поэтому абразивная износостойкость композитов СВМПЭ–СК определяется как прочностью наполнителя, так и сформировавшейся надмолекулярной струк-

туры. При абразивном изнашивании относительно мягкий стеарат кальция, аналогично ПТФЭ [10], не способен «защитить» матрицу от воздействия частиц закреплённого абразива, вследствие чего композиты СВМПЭ–СК не пригодны для использования в условиях абразивного изнашивания.

Роль графита и дисульфида молибдена при абразивном изнашивании, как твердой смазки в повышении износостойкости полимерных композитов на основе СВМПЭ частично нивелируется несоразмерностью наполнителей и зернистости абразива, поэтому абразивная износостойкость композитов с твердыми наполнителями определяется размером зерна абразива и прочностью сформировавшейся надмолекулярной структуры.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность применения стеарата кальция в качестве твердой смазки СВМПЭ при сухом трении скольжения и в условиях смазочной среды.

Установлено, что при содержании микропорошка стеарата кальция 3 мас.% обеспечивается более, чем 4-х кратное повышение сопротивления матричного СВМПЭ изнашиванию при сухом трении скольжения и уменьшение коэффициента трения до 1,2 раза.

Композиты на основе СВМПЭ с мягким микронаполнителем в виде стеарата кальция непригодны для использования в условиях абразивного изнашивания.

Сравнительный анализ твердосмазочных микронаполнителей СВМПЭ – мягких (стеарат кальция, фторопласт) и жестких (графит, дисульфид молибдена) – с позиции сохранения механических свойств, снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в трех исследованных режимах изнашивания показывает, что наиболее эффективным наполнителем при сухом трении скольжения является стеарат кальция. Исследованные композиты на основе СВМПЭ с твердосмазочными наполнителями могут эффективно использоваться для изготовления узлов трения, работающих без смазки.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и БРФФИ (проекты № 12-08-00930_а, 13-08-98068, 14-08-90028, Т14Р-210) с привлечением оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН и Аналитического центра НИ ТПУ.

Литература

1. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. – М.: Машиностроение; – Нью-Йорк: Аллертон Пресс, 1993. – 454 с.
2. Краснов, А.П. О систематизации нанонаполнителей полимерных композитов / А.П. Краснов, В.Н. Адериха, О.В. Афоничева, В.А. Мить, Н.Н. Тихонов, А.Ю. Васильков, Э.Е. Саид-Галиев, А.В. Наумкин, А.Ю. Николаев // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 1. – С. 93–108.
3. Briscoe, B.J. Wear of Polymers / B.J. Briscoe, S.K. Sinha // Proc. Inst. Mech. Eng. J. Eng. Tribol. – 2002. – Vol. 216. – P. 401–413.
4. Stein, H.L. Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) / H.L. Stein // Engineered Materials Handbook. – Vol. 2: Engineering Plastics, ASM International, Ohio: Materials Park, 1999. – P. 167–171.
5. Galetz, M.C. Carbon Nanofibre-Reinforced Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene for Tribological Applications / M.C. Galetz, T. Blar, H. Ruckdaschel, K.W. Sandler, V. Altstadt // Journal of Applied Polymer Science. – 2007. – Vol. 104. – P. 4173–4181.
6. Гоголева, О.В. Износостойкие композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для эксплуатации в экстремальных условиях / О.В. Гоголева, А.А. Охлопкова, П.Н. Петрова // Материаловедение. – 2011. – № 9. – С. 10–13.
7. Kurtz, S.M. The UHMWPE Handbook: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement / S.M. Kurtz. – Academic Press, 2004. – 379 p.
8. Панин, С.В. Износостойкость композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненных микрочастицами графита и дисульфида молибдена / С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Т. Нгуен Суан, Л.Р. Иванова, М.А. Полтаранин, С.В. Шилько // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 4. – С. 442–452.
9. Panin, S. Wear Resistant Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Based Nano- and Microcomposites for Implants / S. Panin, L. Kornienko, N. Sonjaitham, M. Tchaikina, V. Sergeev, L. Ivanova, and S. Shilko // Journal of Nanotechnology. – 2012. – № 1. Special Issue Nanocomposites. Article ID 729756. – 7 p.
10. Панин, С.В. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ–ПТФЭ. Часть 1. Механические и триботехнические свойства матрицы / С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Т. Нгуен Суан, Л.Р. Иванова, М.А. Корчагин, С.В. Шилько, Ю.М. Плескачевский // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 3. – С. 325–333.
11. Машков, Ю.К. Самоорганизация и структурное модифицирование в металлополимерных трибосистемах / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, С.В. Шилько, Ю.М. Плескачевский. – Омск: Изд. ОмГТУ, 2013. – 232 с.
12. Shilko, S.V. Mesomechanical analysis of polymer composites reinforced by short fibers with taking into account an interphase layer / S.V. Shilko, D.A. Chernous, S.V. Panin // Mechanics of Composite Materials. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 171–178.
13. Панин, С.В. Многоцелевой подход в задачах компьютерного конструирования композиционных полимерных материалов / С.В. Панин, Н.Ю. Анохина, С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, Н.Ю. Матолыгина // Труды Всеросс. конф. «Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы», Москва, 30 нояб.–2 дек. 2009. – М.: АльянсТрансАтом, 2010. – С. 133–140.
14. Спицына, Г.А. Смазка для сухого волоочения проволоки / Г.А. Спицына, А.С. Смирнова, Л.М. Гусева // Патент № 2032711, 1995, Россия.
15. Пшеничников, В.Г. Композиция комбинированного фармацевтического хондропротектора / В.Г. Пшеничников // Патент № 2432166, 2011, Россия.
16. Наканиси, К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений / К. Наканиси. – М.: Мир, 1965. – 216 с.

Panin S. V., Kornienko L. A., Nguen Suan, Ivanova L. R., Poltoranin M. A., Shil'ko S. V., and Pleskachevsky Yu. M.

Wear resistance of solid lubricant composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene modified by calcium stearate.

Tribological characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) filled with calcium stearate $C_{36}H_{70}CaO_4$ in conditions of dry friction, boundary lubrication and abrasive wear have been studied in order to create materials for implants. It was shown that the wear rate of the «UHMWPE–calcium stearate» composites under dry sliding friction was reduced by more than four times compared to pure UHMWPE. Thus, mechanical properties vary slightly and the wear rate of the above composites increases with increasing the filler content in an abrasive environment. The optimal filler content was determined in terms of wear resistance. The supermolecular structure and wear surface topography of UHMWPE with different content of calcium stearate were investigated. A comparative analysis of the solid lubricant fillers of materials based on UHMWPE was performed. The mechanisms of their wear were discussed in dry sliding friction and abrasive wear.

Поступила в редакцию 16.02.2015.

© С. В. Панин, Л. А. Корниенко, Т. Нгуен Суан, Л. Р. Иванова, М. А. Полтаранин, С. В. Шилько, Ю. М. Плескачевский, 2015.