

DOI: 10.17516/1999-494X-0440

УДК 678.073

Influence of Thermally Treated Polytetrafluoroethylene on the Tribological Properties of Ultra-High Molecular Polyethylene

Andrey P. Vasilev*,
Sakhayana N. Danilova, Afanasy A. Dyakonov,
Aitalina A. Okhlopkova and Tatyana S. Struchkova
*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University
Yakutsk, Russian Federation*

Received 29.08.2022, received in revised form 10.10.2022, accepted 09.11.2022

Abstract. In this work, the effect of heat treatment of polytetrafluoroethylene (PTFE) on the properties and structure of ultrahigh molecular weight polyethylene was studied. The results of a study on compression, density and tribological characteristics of polymer composites based on UHMWPE filled with initial PTFE and with heat treatment are presented. It is shown that the introduction of polytetrafluoroethylene with heat treatment leads to an improvement in wear resistance by a factor of 4 and compressive strength up to 50 % compared to the polymer matrix. Structural studies have shown that the improvement in wear resistance is associated with a decrease in oxidative processes during friction due to discretely distributed particles of heat-treated PTFE. Due to the high wear resistance, the developed materials can be used in friction units of machines and technical equipment.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, polytetrafluoroethylene, polymer composite materials, wear resistance.

Acknowledgment. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant numbers [FSRG-2020–0017]).

Citation: Vasilev A. P., Danilova S. N., Dyakonov A. A., Okhlopkova A. A., Struchkova T. S. Influence of thermally treated polytetrafluoroethylene on the tribological properties of ultra-high molecular polyethylene. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(7), 850–860. DOI: 10.17516/1999-494X-0440

Влияние термически обработанного политетрафторэтилена на триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена

**А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов,
А. А. Охлопкова, Т. С. Стручкова**
*Северо-Восточный федеральный университет
имени М. К. Аммосова
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. В данной работе исследовано влияние термически обработанного политетрафторэтилена (ПТФЭ) на свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Приведены результаты исследования прочности при сжатии, плотности и триботехнических характеристиках полимерных композитов на основе СВМПЭ, наполненного с исходным ПТФЭ и с термической обработкой. Показано, что введение в СВМПЭ политетрафторэтилена с термической обработкой приводит к улучшению износостойкости в 4 раза и прочности при сжатии до 50 % по сравнению с полимерной матрицей. Структурными исследованиями показано, что улучшение износостойкости связано со снижением окислительных процессов при трении за счет дискретно распределенных частиц термически обработанного ПТФЭ. Благодаря высокой износостойкости разработанные материалы могут найти применение в узлах трения машин и техники.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, износостойкость.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации НИР № FSRG-2020–0017.

Цитирование: Васильев А. П. Влияние термически обработанного политетрафторэтилена на триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов, А. А. Охлопкова, Т. С. Стручкова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(7). С. 850–860. DOI: 10.17516/1999-494X-0440

Введение

В настоящее время расширение марочного ассортимента полимерных материалов достигается за счет их направленной модификации путем введения в полимерную матрицу наполнителей, модификаторов и других добавок. Благодаря этому можно существенно улучшить их технологические и эксплуатационные свойства, создать новые виды продукции для новых областей применения, в том числе в более жестких условиях эксплуатации [1]. Другим эффективным путем направленного изменения свойств полимерных материалов является совмещение термопластов различной природы в целях сочетания их полезных свойств в новом смесевом материале. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) отличается чрезвычайно высокой молекулярной массой от 1000000 и выше. Из-за этого эксплуатационные свойства СВМПЭ отличаются от свойств других полиэтиленов, в частности, СВМПЭ обладает более высокими физико-механическими и химическими свойствами, износостойкостью, стойкостью к растрескиванию и к ударным нагрузкам, морозостойкостью, низким коэффициентом трения, а также способностью сохранять функциональные свойства в широком интервале температур [2]. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) применяется в качестве кон-

струкционного материала и как твердый смазочный материал, вводимый в другие полимеры [3]. ПТФЭ характеризуется низким коэффициентом трения, высокой устойчивостью к агрессивным средам, термической стабильностью и самосмазывающимися свойствами. В работе [4] исследовали триботехнические свойства СВМПЭ, наполненного ПТФЭ с разной дисперсностью. Смешение компонентов проводили в планетарной мельнице в течение 1 и 5 мин. Показано, что при сухом трении происходит двукратное снижение интенсивности изнашивания СВМПЭ, наполненного 10 мас.% ПТФЭ. В другой работе оценено влияние формы фторопласта марки «Флуралит» на триботехнические свойства ПКМ на основе СВМПЭ [5]. В приведенной работе проводили механическую активацию фторопласта с целью увеличения адгезии между наполнителем и матрицей. Показано, что площадь поверхности фторопласта увеличивается при механической активации, что улучшает их совмещение. Установлено, что трение СВМПЭ с фторопластом приводит к снижению температуры при трибоконтакте, что ведет к уменьшению интенсивности изнашивания. Таким образом, актуальным остается поиск новых способов модификации фторопласта с целью улучшения его адгезионного взаимодействия с СВМПЭ.

Эффективным и перспективным способом расширения перечня доступных износостойких полимерных материалов является подход, основанный на усилении модифицирующих эффектов за счет образования более прочных связей на границе раздела фаз полимер–полимер [1]. В работе [6] показано, что при термической обработке морфология поверхности ПТФЭ трансформируется, появляются структурные образования с округлой формой, выступающие на его поверхности. Исходя из этого предполагается, что образование выступов на поверхности порошка ПТФЭ при термической обработке может улучшить его взаимодействие с СВМПЭ из-за увеличения площади поверхности.

Цель работы – исследование влияния модифицированного термической обработкой ПТФЭ на триботехнические свойства и структуру СВМПЭ.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются ПКМ на основе СВМПЭ марки GUR-4022 (Celanese, Китай), с молекулярной массой $5,0 \cdot 10^6$ г/моль, со средним размером частиц 145 мкм и плотностью $0,93$ г/см³. В качестве наполнителя использовали политетрафторэтилен марки ПН-90 (Галополимер, Россия), со средним размером частиц 90 мкм, плотностью $2,16$ г/см³.

Термообработку ПТФЭ проводили при разных температурах (200, 300 и 375 °С) в течение 10 мин и обозначили как «ПТФЭ ТО». Композиты получали стандартным методом переработки СВМПЭ, а именно методом горячего прессования при температуре 175 °С и удельном давлении 10 МПа при выдержке в течение 20 мин, с последующим охлаждением образца до комнатной температуры.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139 при комнатной температуре. Триботехнические характеристики СВМПЭ и ПКМ определяли на универсальной испытательной машине УМТ-3 (СЕТР, США). Коэффициент трения определяли согласно ГОСТ 11629. Схема трения «палец – диск». Образцы диаметром $10,00 \pm 0,02$ мм и высотой $20,0 \pm 0,2$ мм. Контртело – стальной диск из стали 45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатостью $R_a = 0,06–0,08$ мкм. Удельная нагрузка – 1,9 МПа, линейная скорость скольжения – 0,5 м/с. Время испытания составляла 3 ч.

Надмолекулярную структуру и поверхность трения образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-7800F (Jeol, Япония) в режиме вторичных электронов при низком ускоряющем напряжении.

ИК-спектры поверхностей СВМПЭ и ПКМ до и после трения снимали на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием Varian 7000 FT-IR (Varian, США). ИК-спектры получали с помощью приставки НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) в диапазоне 800–4000 см⁻¹.

Результаты и их обсуждение

Одной из важных задач при разработке полимерных композитов является улучшение взаимодействия между полимерной матрицей и наполнителем. В связи с этим для повышения взаимодействия между СВМПЭ и ПТФЭ провели термическую обработку последнего с целью повышения эксплуатационных характеристик. Известно, что даже при температурах, значительно превышающих температуру плавления кристаллов ПТФЭ, не происходит слияния частиц с образованием монолитной массы [7]. В то же время известно, что после термообработки происходит образование слабосвязанных агломератов ПТФЭ, которые достаточно легко могут обратно переводиться в порошкообразное состояние механическим помолом в лопастном смесителе. Исходя из этих соображений первоначально изучено влияние различных температур на морфологию порошков ПТФЭ.

На рис. 1 представлены результаты исследования морфологии порошков ПТФЭ после термической обработки (ПТФЭ ТО) при разных температурах методом сканирующей электронной микроскопии.

Как видно из рис. 1 а, морфология поверхности исходного ПТФЭ и после термической обработки при 200 °С и 300 °С визуально не отличается. Поверхность можно охарактеризовать как достаточно гладкую и без видимых изменений. Таким образом, можно сделать вывод, что при кратковременном температурном воздействии исходного ПТФЭ (с выдержкой 10 мин) при 200 °С и 300 °С морфология поверхности порошка практически не изменяется и сохраняется как у исходного полимера. В то же время увеличение температуры до 375 °С приводит к существенному изменению морфологии поверхности порошка ПТФЭ (рис. 1 г). На поверхности частиц ПТФЭ наблюдаются нетипичные структурные образования, состоящие из фибрилл, которые не видны в исходном ПТФЭ и термически обработанного до 300 °С. Ранее подобные структурные образования на поверхности ПТФЭ были описаны и проанализированы в ряде работ [8–10]. Из этих работ показано, что по форме эти структурные образования практически идентичны и их отличительной особенностью является разброс по размерам, варьируемым от 1 до 5 мкм, что, по-видимому, обусловлено термической предысторией. Размеры структурных образований и расстояние между ними на поверхности ПТФЭ в данной работе можно оценить в ~2 мкм. Из проведенных структурных исследований можно предположить, что подобное изменение морфологии поверхности ПТФЭ приводит к увеличению площади поверхности (геометрической). Предполагается, что благодаря этому будет лучшее адгезионное сцепление между СВМПЭ и ПТФЭ ТО, что улучшит механические и трибологические свойства материала. Таким образом, в дальнейшем были использованы порошки ПТФЭ после термической обработки при 375 °С.

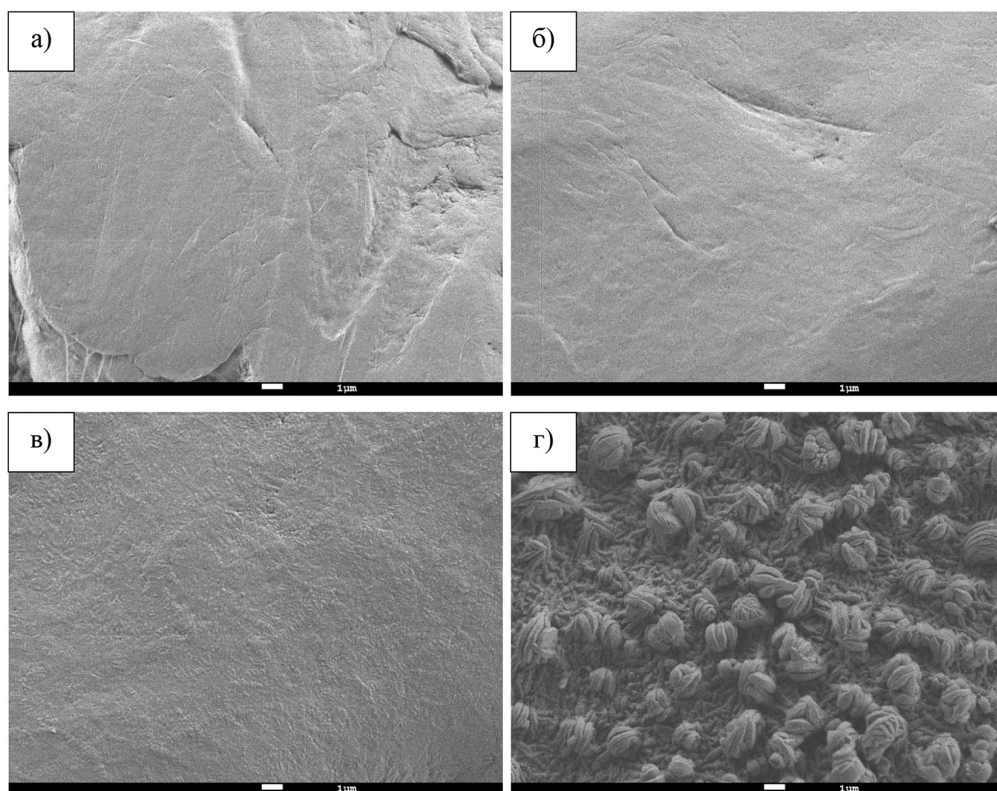


Рис. 1. Микрофотографии морфологии поверхности порошка ПТФЭ в зависимости от температуры: а) исходный ПТФЭ; б) при 200 °С; в) при 300 °С; г) при 375 °С

Fig. 1. Micrographs of PTFE powder surface morphology depending on temperature: a) initial PTFE; b) at 200 °C; c) at 300 °C; d) at 375 °C

На рис. 2 приведены результаты исследования надмолекулярной структуры СВМПЭ, наполненного исходным ПТФЭ и ПТФЭ ТО методом сканирующей электронной микроскопии.

Из рис. 2 а видно, что введение исходного ПТФЭ приводит к разрыхлению надмолекулярной структуры СВМПЭ. Кроме того, видны пустоты, что связано со слабым взаимодействием между полимерами. При увеличении СВМПЭ + ПТФЭ можно видеть отдельные частицы ПТФЭ. В надмолекулярной структуре СВМПЭ+ПТФЭ ТО визуально пустоты не наблюдаются. Кроме того, не видны отдельные частицы ПТФЭ, возможно, из-за образования выступающих на поверхности структурных образований частицы ПТФЭ достаточно хорошо покрыты СВМПЭ.

В таблице 1 приведены результаты исследования прочности при сжатии и плотности композитов на основе СВМПЭ в зависимости от содержания и термообработки ПТФЭ.

Из табл. 1 видно, что напряжение при сжатии при относительной деформации 5 % и 10 % СВМПЭ+ПТФЭ увеличивается на 29–41 % относительно полимерной матрицы и независимо от содержания ПТФЭ. В случае ПКМ, наполненного 5–10 мас.% ПТФЭ ТО, наблюдается повышение напряжения при сжатии на 33–50 %. Установлено, что при увеличении содержания ПТФЭ ТО в ПКМ до 15 мас.% показатель напряжения при сжатии снижается до уровня исходного СВМПЭ. Плотность СВМПЭ при введении исходного ПТФЭ существенно увеличивается

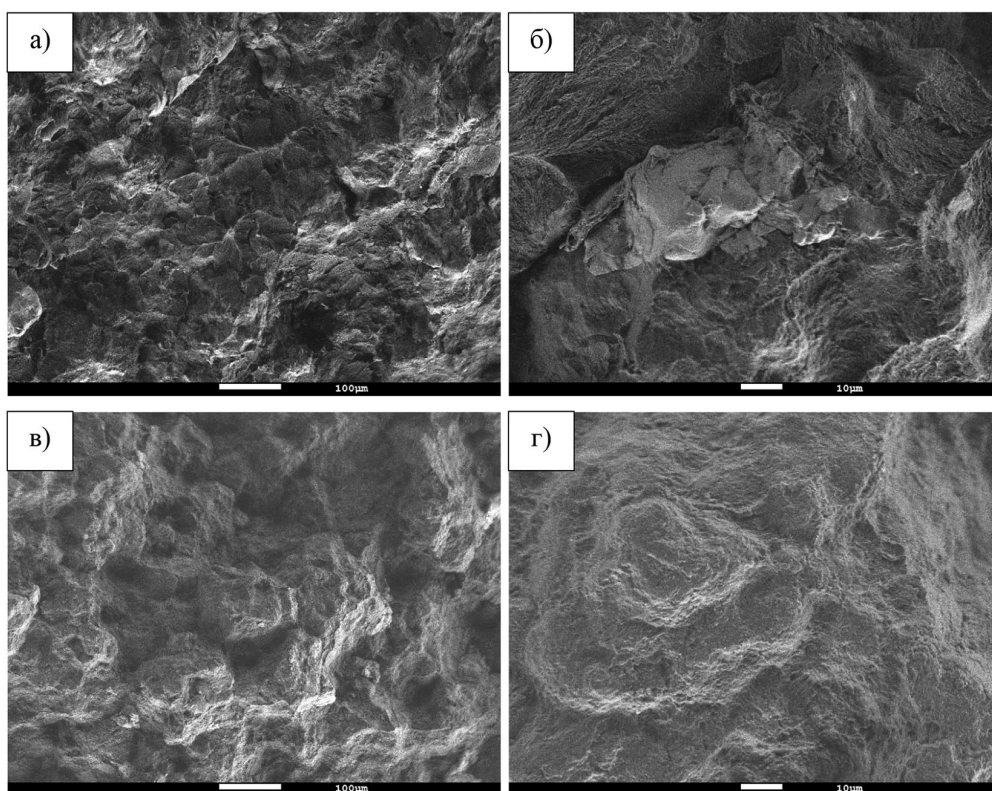


Рис. 2. Надмолекулярная структура ПКМ: а) при увеличении $\times 150$ и б) при увеличении $\times 1000$ образцов СВМПЭ+ПТФЭ; в) при увеличении $\times 150$ и г) при увеличении $\times 1000$ образцов СВМПЭ+ПТФЭ ТО

Fig. 2. Supramolecular structure of PCM: a) at $\times 150$ magnification and b) at $\times 1000$ magnification of samples of UHMWPE + PTFE initial; c) at $\times 150$ magnification and d) at $\times 1000$ magnification of samples of UHMWPE + PTFE TO

Таблица 1. Прочность при сжатии и плотность композитов

Table 1. Compressive Strength and Density of Composites

Образец	$\sigma_{сд}$, при 5 % деф., МПа	$\sigma_{сд}$, при 10 % деф., МПа	ρ , г/см ³
СВМПЭ	12 ± 1	17 ± 1	0,93
СВМПЭ+5 мас.% ПТФЭ	17 ± 1	24 ± 1	0,95
СВМПЭ+10 мас.% ПТФЭ	16 ± 1	23 ± 1	0,98
СВМПЭ+15 мас.% ПТФЭ	16 ± 1	22 ± 1	1,01
СВМПЭ+5 мас.% ПТФЭ ТО	18 ± 1	26 ± 1	0,94
СВМПЭ+10 мас.% ПТФЭ ТО	16 ± 1	23 ± 1	0,95
СВМПЭ+15 мас.% ПТФЭ ТО	12 ± 1	20 ± 1	0,97

Примечание: $\sigma_{сд}$ – напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (5, 10 %); ρ – плотность.

по сравнению с композитами, содержащими ПТФЭ ТО. Установлено, что наибольшее значение плотности достигает при содержании 15 мас.% ПТФЭ. Это обусловлено тем, что плотность полимера ПТФЭ значительно больше ($2,16 \text{ г/см}^3$), чем плотность СВМПЭ ($0,93 \text{ г/см}^3$). Подобная же зависимость изменения плотности СВМПЭ при введении ПТФЭ ранее выявлена в работах [4, 11]. Более низкие значения плотности для композитов СВМПЭ+ПТФЭ ТО, возможно, связаны с тем, что термически обработанные ПТФЭ теряют пластичность и характеризуются более высокой насыпной плотностью по сравнению с материалами без термообработки.

Проведены исследования триботехнических свойств ПКМ на основе СВМПЭ, наполненного исходным и термически обработанным ПТФЭ. На рис. 3 представлены результаты исследования скорости массового изнашивания и коэффициент трения ПКМ в зависимости от содержания наполнителя.

Из рис. 3 а видно, что у композитов, содержащих исходный ПТФЭ, скорость массового изнашивания сопоставима с ненаполненным СВМПЭ. Введение ПТФЭ ТО в количестве 5–10 мас.% в СВМПЭ приводит к снижению скорости массового изнашивания в 4 раза по сравнению с исходной полимерной матрицей. При содержании ПТФЭ ТО до 15 мас.%, скорость массового изнашивания снижается в 2 раза относительно ненаполненного СВМПЭ и композитов без термообработки. Коэффициент трения во всех ПКМ идентичен значению исходного СВМПЭ и сохраняется на его уровне независимо от содержания ПТФЭ и его термической обработки. Таким образом, исходя из результатов прочности при сжатии и триботехнических характеристик установлено, что оптимальными свойствами обладают композиты с содержанием 5–10 мас.% ПТФЭ ТО.

Проведены ИК-спектроскопические исследования СВМПЭ и ПКМ в зависимости от содержания ПТФЭ, результаты представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в ИК-спектрах до трения СВМПЭ + ПТФЭ наблюдаются характеристические пики в области 2915 , 2848 и 1462 см^{-1} , относящиеся к полимерной матрице [12]. Выявлены новые пики в области 1201 и 1149 см^{-1} , относящиеся к валентным колебаниям $-\text{CF}_2$ [13]

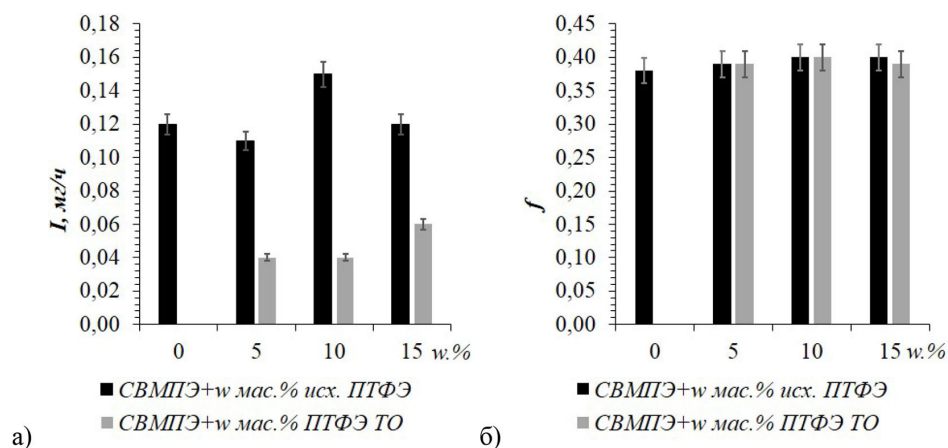


Рис. 3. Триботехнические характеристики СВМПЭ и ПКМ на его основе: а) скорость массового изнашивания; б) коэффициент трения

Fig. 3. Tribological properties of UHMWPE and PCM based on it: a) mass wear rate; b) coefficient of friction

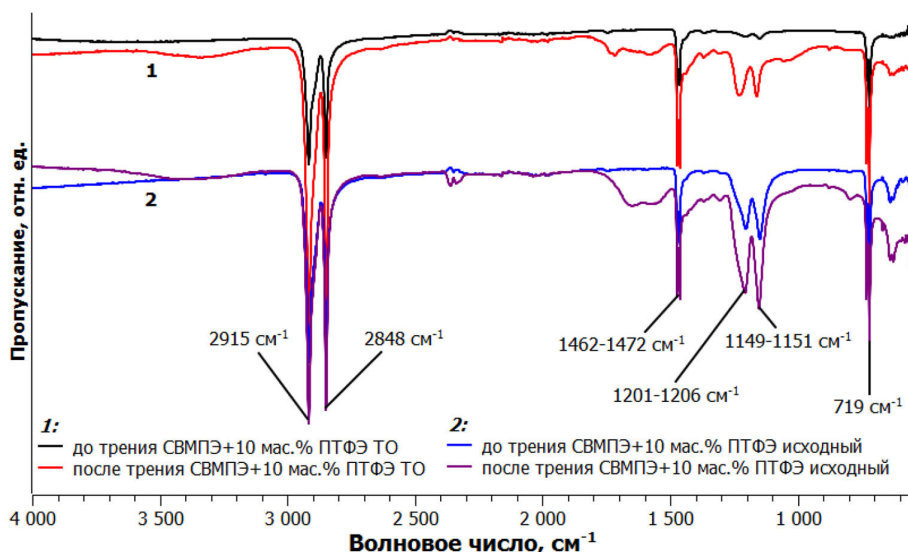


Рис. 4. ИК-спектры ПКМ до и после трения в зависимости от способа обработки ПТФЭ

Fig. 4. IR spectra of PCM before and after friction, depending on the processing method PTFE

(2). В СВМПЭ + ПТФЭ ТО до трения пики, относящиеся к ПТФЭ слабо проявляются (1). Это, возможно, связано с тем, что частицы ПТФЭ ТО хорошо покрываются макромолекулами полимерной матрицы, о чем также свидетельствуют результаты микроскопических исследований (рис. 2 г). В ИК-спектрах поверхности трения ПКМ сохраняются основные пики полимерной матрицы, а также усиливаются пики, относящиеся к ПТФЭ. В композитах после трения зарегистрированы полосы в области ~ 1644 cm^{-1} и $3200\text{--}3600$ cm^{-1} , отвечающие кислородсодержащим группам [14]. Видно, что в композитах с ПТФЭ ТО интенсивность полос ниже, что свидетельствует о предотвращении окислительных процессов во время трения, что способствует снижению скорости массового изнашивания.

Далее на рис. 5 приведены результаты исследования поверхности трения СВМПЭ, наполненного исходным ПТФЭ и ПТФЭ ТО, методом сканирующей электронной микроскопии.

Как видно из рис. 5 а, б, фторопласт наблюдается в отдельных участках и «размазан» на поверхности трения ПКМ, видны бороздки по направлению трения. В то же время из рис. 5 в видно, что частицы ПТФЭ ТО на поверхности трения распределены дискретно по всей поверхности. При большом увеличении заметно (рис. 5 г), что ПТФЭ ТО достаточно прочно удерживаются на поверхности трения, тем самым, возможно, дополнительно защищают материал от изнашивания. Благодаря дискретному распределению ПТФЭ ТО на изношенной поверхности ПКМ приводит к снижению окислительных процессов при трении, что согласуется с результатами ИК-спектроскопии.

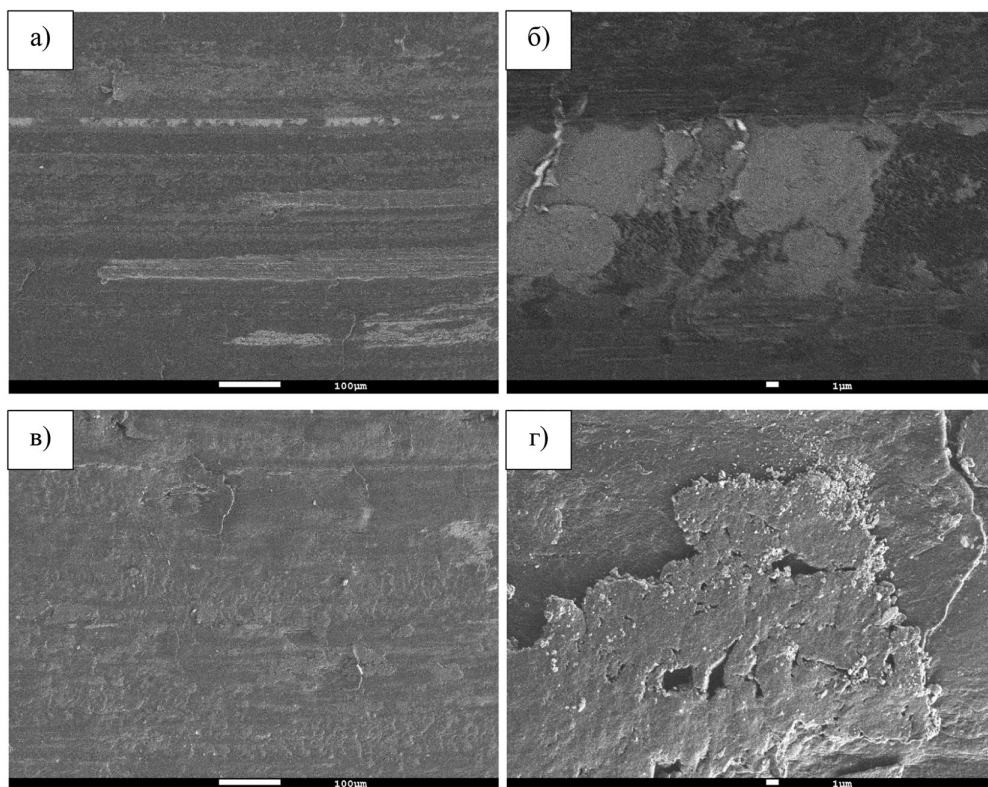


Рис. 5. Поверхность трения ПКМ: а) при увеличении $\times 150$ и б) при увеличении $\times 3000$ образцов СВМПЭ+ПТФЭ; в) при увеличении $\times 150$ и г) при увеличении $\times 3000$ образцов СВМПЭ+ПТФЭ ТО

Fig. 5. Friction surface of PCM: a) at $\times 150$ magnification and b) at $\times 3000$ magnification of UHMWPE + PTFE samples ref.; c) at $\times 150$ magnification and d) at $\times 3000$ magnification of UHMWPE+PTFE TO samples

Выводы

Исследовано влияние термической обработки на морфологию порошка ПТФЭ. Установлено, что морфология ПТФЭ изменяется значительно при температуре $375\text{ }^{\circ}\text{C}$, так на частицах полимера образуются структурные элементы, выступающие на его поверхности. Введение ПТФЭ ТО в СВМПЭ позволило снизить скорость массового изнашивания в 4 раза и повысить напряжение при сжатии на 50 % по сравнению с исходным полимером и композитами без термической обработки фторопласта. Показано, что коэффициент трения и плотность композитов с ПТФЭ ТО сохраняются на уровне полимерной матрицы. Разработанные материалы, благодаря высокой износостойкости и прочности при сжатии, могут быть рекомендованы для применения в узлах трения машин и техники.

Список литературы / References

[1] Калинин Э.Л., Саковцева М.Б., Павлова И.В., Кавокин Е.И., Сакович Д.А. Эффективный подход к созданию современных полимерных композиционных материалов. *Полимерные материалы*, 2008, (3), 4–14 [Kalinichev E. L., Sakovtseva M. B., Pavlova I. V., Kavokin E. I., Sakovich D. A. Effective Approach to Advanced Composite Materials Designing. *Polymer materials*, 2008, (3), 4–14 (in Rus.)]

[2] Андреева И. Н. Веселовская Е. В., Наливайко Е. И., Печенкин А. Д., Бухгалтер В. И., Поляков А. В. *Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности*, М.: Химия, 1982, 80. [Andreeva I. N. Veselovskaya E. V., Nalivaiko E. I., Pechenkin A. D., Accountant V. I., Polyakov A. V. *Ultra High Molecular Weight Polyethylene High Density*, Moscow, Khimiya, 1982, 80 (in Rus.)]

[3] Panda J.N., Bijwe J., Pandey R.K. Particulate PTFE as a super-efficient secondary solid lubricant in PAEK composites for exceptional performance in adhesive wear mode, *Composites Part C: Open Access*, 2021, 4, 100110.

[4] Panin S.V., Kornienko L.A., Nguen S., Ivanova L.R., Korchagin M.A., Shil'ko S.V., Pleskachevskii Y.M. Wear resistance of composites based on hybrid UHMWPE–PTFE matrix: mechanical and tribotechnical properties of the matrix, *Journal of Friction and Wear*, 2015, 36(3), 249–256.

[5] Bochkareva S.A., Grishaeva N.Y., Lyukshin P.A., Lyukshin B.A., Panin S.V. Simulation of UHMWPE composites filled with preliminary mechanically activated PTFE particles, *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2018, 2051(1), 020035.

[6] Охлопкова А. А. Стручкова Т. С., Васильев А. П., Алексеев А. Г., Дьяконов А. А. Влияние термической обработки на надмолекулярную структуру порошка политетрафторэтилена. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. МК Аммосова, 2016, 4(54), 48–57. [Okhlopkova A. A., Struchkova T. S., Vasilev A. P., Alekseev A. G., Dyakonov A. A. Study the Effects of Heat Treatment on the Supramolecular Structure Powder Polytetrafluoroethylene, *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2016, 4(54), 48–57 (in Rus.)]

[7] Берлин А. А., Басин В. Е. *Основы адгезии полимеров*, М.: Химия, 1974. 392. [Berlin A. A., Basin V. E. *Fundamentals of Polymer Adhesion*, Moscow, Khimiya, 1974, 392 (in Rus.)]

[8] Соболев Г. П., Ильин А. Н. Роль структуры материала наноуровня для изделий из фторопласта-4, *Journal Fluorine Notes*, 2011, 1, 74. [Sobolev G. P., Ilyin A. N. The Role of the Nanolevel Material Structure for PTFE Products, *Journal Fluorine Notes*, 2011, 1, 74 (in Rus.)]

[9] Gu D., Song K., Chen S., Liu S., Yang B., Ma X., Wang Z., Wang S. Multistage textured superhydrophobic polytetrafluoroethylene surface prepared by fabric embossing and thermal annealing, *Materials Letters*, 2020, 268, 127556.

[10] Glaris P., Coulon J.F., Dorget M., Poncin-Epaillard F. Thermal annealing as a new simple method for PTFE texturing. *Polymer*, 2013, 54(21), 5858–5864.

[11] 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, Известия высших учебных заведений, Химия и химическая технология, 2018, 61(11), 88–95. [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, 61(11), 88–95 (in Rus.)]

[12] Данилова С. Н., Ярусова С. Б., Охлопкова А. А., Гордиенко П. С., Слепцова С. А., Буравлев И. Ю., Ванг Лянсай, Цзяо Ян. Разработка износостойких полимер-полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ, Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2020, 25(3), 130–142. [Danilova S.N., Yarusova S.B., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Sleptsova S.A., Buravlev I. Yu., Wang Liansai, Jiao Yang. The development of wear-resistant polymer-polymer

composite materials based on UHMWPE, *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2020, 25(3), 130–142 (in Rus.)]

[13] Стручкова Т. С., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Павлова Е. И., Алексеев А. Г. Исследование влияния талька и технического углерода на структуру и свойства политетрафторэтилена, *Полимерные материалы и технологии*, 2021, 7(4), 39–49. [Struchkova T. S., Vasilev A. P., Okhlopko A. A., Pavlova E. I., Alekseev A. G. Study of the effect of talc and industrial carbon black on the structure and properties of polytetrafluoroethylene, *Polymer materials and technologies*, 2021, 7(4), 39–49 (in Rus.)]

[14] Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Васильев А. П., Герасимова Ю. С., Охлопкова А. А., Слепцова С. А. Исследование триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензотиазолом. *Вопросы материаловедения*, 2019, (3), 91–98. [Danilova S. N., Dyakonov A. A., Vasiliev A. P., Gerasimova Y. S., Okhlopko A. A., Sleptsova S. A. Tribo-technical properties of ultra-high molecular weight polyethylene filled with sulfur, diphenylguanidine and 2-mercaptobenzothiazole, “*Voprosy Materialovedeniya*” (*Materials Science Issues*), 2019, (3), 91–98. (in Rus.)]