

DOI: 10.17516/1999-494X-0418

УДК 678.073

Investigation of Tribological Properties of Polymer Composites Based on PTFE in the Dry Friction Mode and in the Medium of Liquid Lubricants

Marfa A. Markova*,
Pavlina N. Petrova and Andrei L. Fedorov
*Institute of Problems of Oil and Gas, Siberian Branch
Russian Academy of Sciences Siberian Branch of RAS
Yakutsk, Russian Federation*

Received 02.06.2022, received in revised form 22.07.2022, accepted 16.08.2022

Abstract. This paper presents the data of tribotechnical studies of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and carbon fillers of the brand UVIS-AK-P, depending on the content of fillers and the technology of their production. Two types of technology for the production of polymer composites are considered, based on the use of joint mechanical activation of composite components and rolling technology of powder composition. Tribotechnical tests of composites were carried out in the dry friction mode and in the medium of liquid lubricants under various modes of tribo-loading.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fibers, wear, lubrication, engine oils.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162–9 using scientific equipment of the Center for Collective Use of the Institute of problems of oil and gas, Siberian branch, Russian academy of sciences Siberian Branch of RAS (grant №13.CCU.21.0016).

Citation: Markova, M.A., Petrova, P.N., Fedorov, A.L. Investigation of tribological properties of polymer composites based on PTFE in the dry friction mode and in the medium of liquid lubricants. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(5), 569–582. DOI: 10.17516/1999-494X-0418

Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок

М. А. Маркова, П. Н. Петрова, А. Л. Федоров
ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН
«Институт проблем нефти и газа»
Сибирского отделения РАН
Российская Федерация, Якутск

Аннотация. В настоящей работе приведены данные триботехнических исследований полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и углеродных наполнителей марки УВИС-АК-П в зависимости от содержания наполнителей и технологии их получения. Рассмотрены два вида технологии получения полимерных композитов, основанные на использовании совместной механоактивации компонентов композита и технологии вальцевания порошковой композиции. Триботехнические испытания композитов проведены в режиме сухого трения и в среде жидких смазок при различных режимах трибонагружения.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные волокна, износ, смазка, моторные масла.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162–9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Цитирование: Маркова, М. А. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок / М. А. Маркова, П. Н. Петрова, А. Л. Федоров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(5). С. 569–582. DOI: 10.17516/1999-494X-0418

Введение

С развитием современной техники и технологии возникает необходимость разработки новых видов материалов, которые по своим эксплуатационным характеристикам отличались бы высокими прочностными свойствами, износостойкостью, устойчивостью к суровым климатическим условиям и др. В связи с этим повышение срока службы полимерных деталей в металлополимерных узлах трения в современных машинах и оборудовании является одной из основных задач в машиностроении. Данная задача решается путем создания и разработки различных методов модифицирования полимеров, включающих не только введение наполнителей, но технологические приемы получения композитов. Использование целого комплекса модификаций позволяет регулировать структуру и свойства полимерных композитов в достаточно широком диапазоне. Эта практика широко используется сегодня специалистами, в результате чего открываются перспективные возможности для их широкого внедрения в различные отрасли промышленности.

Существует множество полимеров триботехнического назначения, но благодаря очень низкому коэффициенту трения, химической инертности и широким рабочим температурным интервалам политетрафторэтилен (ПТФЭ) является очень привлекательным материалом для использования в узлах трения. Анализ результатов многих работ показывает, что ПКМ на основе ПТФЭ имеют особое значение в решении задачи повышения надежности и долговечности несмазываемых узлов трения [1–8]. В машиностроении в настоящее время широко применяют

композиционные материалы на основе ПТФЭ для изготовления подшипников скольжения, манжет, уплотнительных колец, прокладок гидравлических систем, уплотнений поршневых и плунжерных компрессоров, скользящих опор машин, деталей систем управления и т.д. [9]

Однако особенности реологических свойств ПТФЭ и композитов на его основе требует нетрадиционных подходов к методам их переработки и подготовки. Несовершенство структуры фторкомпозитов на молекулярном и межфазном уровнях связано со строением макромолекулы ПТФЭ, обуславливающим отсутствие вязкотекучего состояния, и выраженной инертностью макромолекул в процессах физико-химического взаимодействия с компонентами любого состава, строения, технологии получения. Это обстоятельство диктует необходимость применения специальных технологических приемов для формирования изделия, обеспечивающих эффективное взаимодействие на границе раздела фаз с формированием малодефектной структуры при температурном влиянии на образец.

Основное требование, которое предъявляется к любой полимерной композиции, – это высокая однородность материала. Однако при введении малого количества наполнителя в полимерную матрицу происходит образование агломератов из частиц наполнителя, особенно при введении дисперсных наполнителей. В связи с этим для достижения высоких эксплуатационных свойств у полимерных композиционных материалов (ПКМ) в большинстве случаев необходимо диспергировать агломераты наполнителя, т.е. использовать методы диспергирующего смешения компонентов. Для достижения этой цели и повышения адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер-наполнитель многие исследователи используют различные технологические приемы, одним из эффективных и недорогих способов является механическая активация наполнителей и полимерных связующих в различных активаторах.

В связи с этим целью данной работы является исследование влияния технологии получения ПКМ на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон УВИС-АК-П на их триботехнические характеристики при различных режимах трения.

Объекты и методы исследования

В качестве полимерной матрицы выбран промышленно-выпускаемый ПТФЭ марки ПН, который относится к материалам антифрикционного назначения, которые способны функционировать и при криогенных, и при повышенных температурах (от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$) и обладает среди полимерных материалов самым низким коэффициентом трения. В качестве наполнителя ПТФЭ использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия). Выбор углеродного наполнителя марки УВИС-АК-П обусловлен высокой теплопроводностью. Теплопроводность углеродного волокна из гидратцеллюлозы при комнатной температуре составляет $50\text{--}80\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [10]. При работе узла трения выделяется энергия в виде тепла, что приводит к существенному разогреву. Поэтому при работе узла трения требуется отвод тепла от зоны контакта. Для этого материал должен обладать высокой теплопроводностью и высокой температурой размягчения. Материалы с низкой температурой размягчения работают в узлах трения очень неустойчиво. Коэффициент теплопроводности исследуемого композита ПТФЭ – УВИС-АК-П, рассчитанный согласно уравнению Максвелла для двухфазных систем [11], [12], составляет $0,96\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, тогда как у исходного ПТФЭ он составляет $0,25\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. По справочным данным

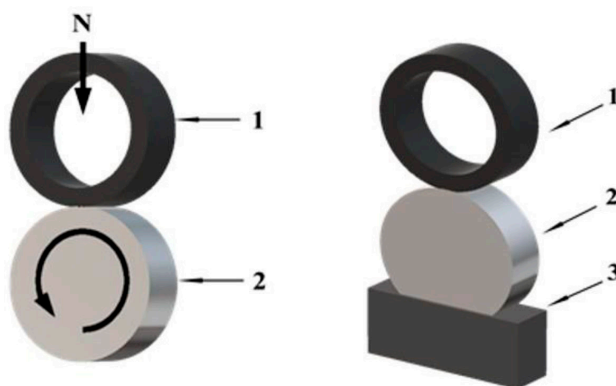


Рис. 1. Схема трения «Диск-диск» а) сухое трение; б) в режиме граничной смазки: 1 – образец для испытания; 2 – стальное контртело; 3 – ванна со смазочным материалом

Fig. 1. Disk-disk friction scheme a) dry friction; b) boundary lubrication mode: 1 – test sample; 2 – steel counterbody; 3 – bath with lubricant

температура размягчения по Вика для ПТФЭ равен 110 °С, а для промышленно-выпускаемого композита на его основе Ф4К20 140–160 °С [13], что является верхним пределом температуры эксплуатации в узлах трения.

Триботехнические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания, поверхностная температура, площадь дорожки трения) при разных действующих на образец нагрузках, скоростей и сред определяли на машине трения ИИ-5018 по ГОСТ Р 50–54–107–88, схема трения «диск-диск», позволяющая имитировать работу подшипников скольжения (рис. 1).

В качестве жидких смазочных сред при трении ПКМ использованы промышленное масло марки И-20А, трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17u, гидравлическое масло марки Роснефть Hidrotec HLP 46.

Структурные исследования полученных ПКМ проводили на низковакуумном растровом электронном микроскопе JSM-6480LV фирмы «JEOL» и ИК-спектрометре Varian 7000 FT-IR в области длин волн 400–4000 см⁻¹ с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Результаты исследований и их обсуждение

В ранее проведенных работах [14] показана перспективность использования углеродных волокон марки УВИС-АК-П в качестве наполнителя ПТФЭ. В этих работах рассмотрены рецептуры ПТФЭ + 1, 3, и 5 мас.% УВИС-АК-П, где композит ПТФЭ + 5 мас.% УВ, полученный с использованием технологии совместной механической активации и введения наполнителя через концентрат, характеризуется повышенной износостойкостью и оптимальным комплексом деформационно-прочностных свойств. Однако при повышении содержания углеродных волокон в полимерной матрице до 7 и 10 мас.% происходит некоторое снижение триботехнических и физико-механических характеристик, что может быть связано с образованием более пористой структуры ПКМ. В связи с этим для снижения пористости использован прием вальцевания порошковой композиции на лабораторных вальцах СМ 350 150/150 при расстоянии между вальцами менее 1 мм с последующим измельчением на лопастном смесителе полученного листового материала.

Установлено, что при использовании технологии вальцевания износостойкость композитов повышается в 4–8 раза по сравнению с композитами, полученными с использованием только совместной механоактивацией компонентов в планетарной мельнице (рис. 2). Это обусловлено снижением пористости данных композитов (табл. 1), что дает положительный эффект в повышении их прочности и износостойкости. Из табл. 1 видно, что у композита, содержащего 5 мас.% УВ, после вальцевания пористость снизилась на 9 %, а у композитов, содержащих 7 и 10 мас.% УВ, на 15 и 18 % по сравнению с композитами, полученными с использованием только технологии совместной механоактивации компонентов.

Результаты триботехнических испытаний ПТФЭ и композитов на его основе представлены на рис. 2. Процесс трения проводился при $P=260$ Н, $v=0,2$ м/с.

По результатам данных при нагрузочно-скоростном режиме испытаний соответствующей 260 Н и 0,2 м/с ПКМ, полученные с применением технологии вальцевания порошковой композиции, характеризуются более низкими значениями скорости массового изнашивания.

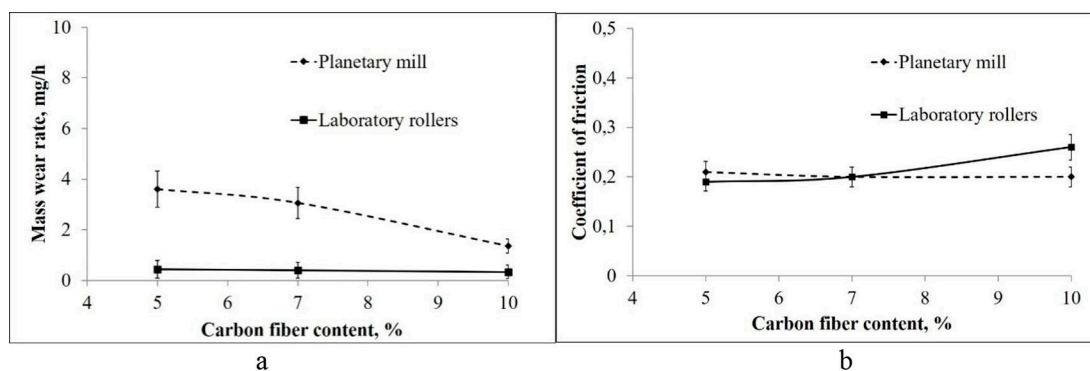


Рис. 2. Триботехнические параметры композитов в зависимости от содержания наполнителя и технологии получения ПКМ: а) скорость массового изнашивания; б) коэффициент трения

Fig. 2. Tribotechnical parameters of composites depending on the filler content and the technology of obtaining PCM: a) the rate of mass wear; b) the coefficient of friction

Таблица 1. Зависимость пористости композитов от технологии получения ПКМ

Table 1. Dependence of the porosity of composites on the technology of obtaining PCM

Состав	Технология получения ПКМ	ρ , г/см ³	П, %
ПТФЭ	-	2,17	8,10
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П	Стандартная	2,02	14,40
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П	Механоактивация 400 об/мин	2,03	13,81
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П	Обработка вальцеванием	2,06	12,52
ПТФЭ+7 мас.% УВИС-АК-П	Механоактивация 400 об/мин	1,92	18,42
ПТФЭ+7 мас.% УВИС-АК-П	Обработка вальцеванием	1,98	15,93
ПТФЭ+10 мас.% УВИС-АК-П	Механоактивация 400 об/мин	1,93	18,22
ПТФЭ+10 мас.% УВИС-АК-П	Обработка вальцеванием	1,99	15,44

Примечание: ρ -плотность; П-пористость

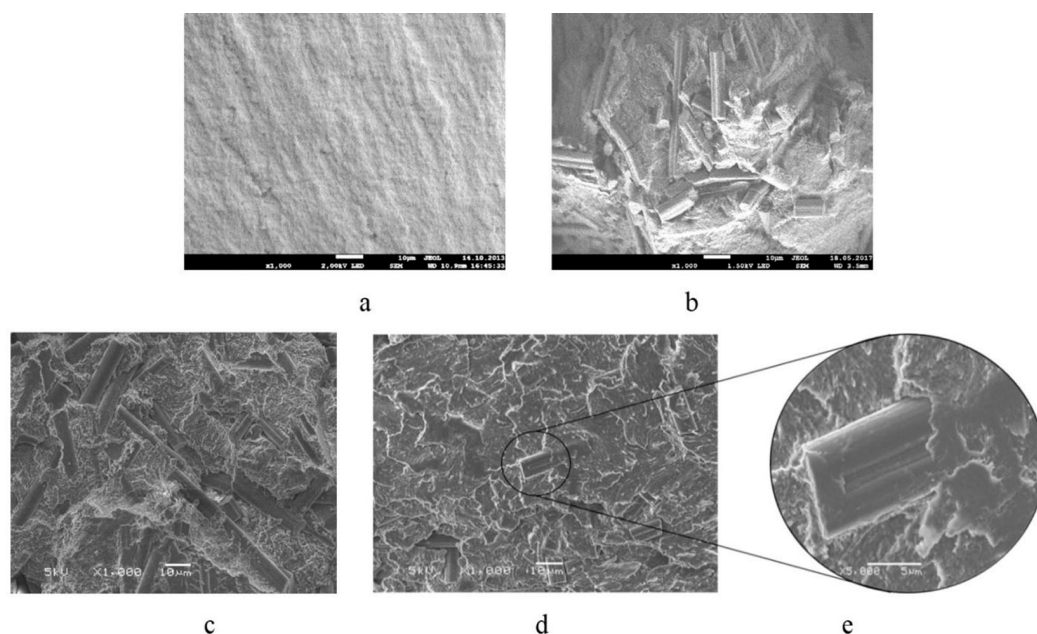


Рис. 3. Надмолекулярная структура ПКМ в зависимости от технологии получения $\times 1000$: а) ПТФЭ; б) простое смешение; в) совместная механоактивация; г) вальцевание; д) $\times 5000$ увеличение

Fig. 3. Supramolecular structure of PCM depending on the technology of obtaining $\times 1000$: a) PTFE; b) simple mixing; c) joint mechanical activation; d) rolling; e) $\times 5000$ magnification

Как видно из микрофотографий, исходный ПТФЭ имеет ленточное строение (рис. 3, а), а при введении УВ с использованием традиционной технологии смешения полимера с УВ не происходит изменения надмолекулярной структуры полимера. Это связано с инертностью ПТФЭ и низкой структурной активностью неактивированных УВ, из-за чего адгезия между полимерной матрицей и УВ крайне мала. На поверхности излома композита (рис. 3, б) наблюдаются пустоты, особенно вблизи углеродного волокна, вследствие чего формируется рыхлая и пористая структура.

Использование технологии совместной механоактивации компонентов и вальцевания порошковой смеси при разработке полимерных композитов позволяет повысить структурную активность УВ по отношению к полимерной матрице, что оказывает существенное влияние на процессы структурообразования полимера (рис. 3 в, г). В этом случае наблюдается изменение надмолекулярной структуры полимера с образованием сферолитоподобных структур. Однако характер разрушения композитов при получении низкотемпературного скола отличается в зависимости от технологии их получения. На поверхности скола ПКМ (рис. 3, г) количество УВ в открытом виде намного меньше, по сравнению с ПКМ, представленного на рис. 3, в. Это связано с тем, что при использовании технологии вальцевания характер разрушения в основном носит когезионный характер, что говорит о повышении адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер – наполнитель. Композиты, полученные с использованием технологии совместной механоактивации компонентов, разрушаются по границе раздела полимер – УВ. На рис. 3, д видно, что УВ находится внутри плотно обволакивающей его полимерной матрицы, структура менее дефектная, пустоты на границе полимер – УВ не наблюдаются. Таким образом,

комбинация технологии совместной механоактивации компонентов и вальцевания порошковой смеси при разработке полимерных композитов являются технологическими приемами, позволяющими повысить структурную активность дискретных УВ и интенсифицировать адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз полимер-наполнитель.

В связи с этим далее проводили трибоиспытания при повышенных нагрузках и скорости скольжения стального вала 0,2 и 0,5 м/с в среде различных масел и без них именно композиты с содержанием УВ 7–10 мас.% (табл. 2).

Известно [15], [16], что полимеры, являющиеся вязкоупругими материалами, очень чувствительны к фрикционному нагреву. Установлено, что при сухом трении увеличение скорости скольжения приводит к повышению коэффициента трения (табл. 2, рис. 4), что ведет к существенному повышению фрикционной температуры (~ на 30 °С), приводящей к интенсификации процессов изнашивания композитов, так как тепловыделение при трении является результатом деформации материала на пятнах фактического контакта. Повышение коэффициента трения также связано с деформацией ползучести ПКМ под нагрузкой, приводящей к росту площади фактического контакта, вследствие чего повышается адгезионная составляющая коэффициента трения. Изнашивание ПКМ происходит в основном по механизму многоциклового фрикционной усталости.

Таким образом, можно предположить, что при повышении скорости скольжения с 0,2 до 0,5 м/с при нагрузке 550 Н происходит переход от упругого контакта к пластическому, как описано S. Lafaye и др. [17].

Таблица 2. Зависимость триботехнических показателей ПКМ от содержания УВИС-АК-П и режимов трения

Table 2. Dependence of tribotechnical indicators of PCM on the content of UVIS-AK-P and friction modes

Состав	Режим трения	Среда	I, мг/ч	S, мм ²	T _п °С
ПТФЭ+7 мас.% УВ, вальцы, 50/50	550Н, 0,2 м/с	–	2,23	57,15	57,5
	550Н, 0,5 м/с	–	4,83	69,79	83,1
	550Н, 0,2 м/с	И-20А	-	36,30	43,2
	550Н, 0,5 м/с	И-20А	-	47,09	63,3
	550Н, 0,2 м/с	Gidrotec HLP 46	-	49,65	45,2
	550Н, 0,5 м/с	Gidrotec HLP 46	-	52,60	54,4
	550Н, 0,2 м/с	Siboil TAD-17u	-	33,54	39,8
	550Н, 0,5 м/с	Siboil TAD-17u	-	38,48	49,4
ПТФЭ+10 мас.% УВ, вальцы, 50/50	550Н, 0,2 м/с	–	4,66	68,92	61,8
	550Н, 0,5 м/с	–	11,16	82,08	96,8
	550Н, 0,2 м/с	И-20А	-	45,09	54,6
	550Н, 0,5 м/с	И-20А	-	47,79	59,4
	550Н, 0,2 м/с	Gidrotec HLP 46	-	48,11	56,3
	550Н, 0,5 м/с	Gidrotec HLP 46	-	48,01	59,3
	550Н, 0,2 м/с	Siboil TAD-17u	-	42,65	45,0
	550Н, 0,5 м/с	Siboil TAD-17u	-	45,60	49,9

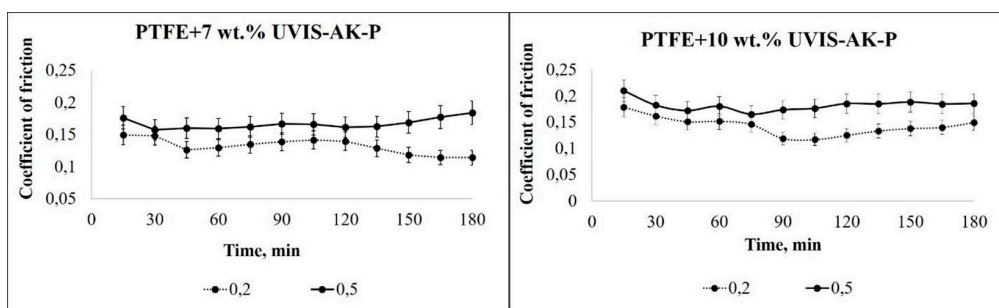


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения ПКМ от скорости скольжения и времени испытания

Fig. 4. Dependence of the coefficient of friction of the PCM on the sliding speed and test time

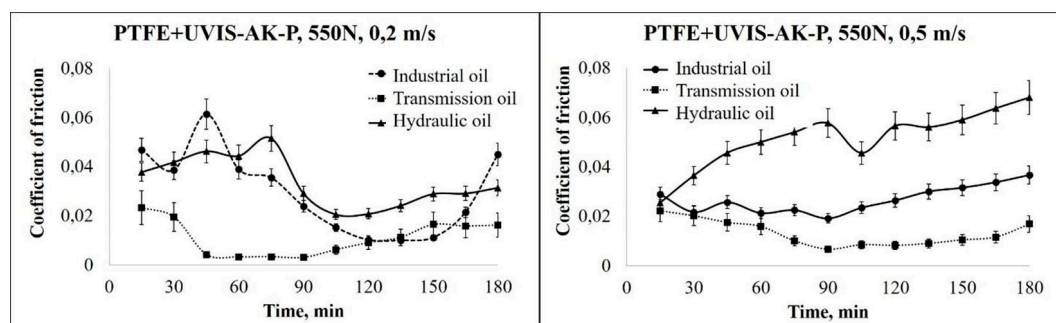


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения ПКМ от использованной смазки и времени испытания

Fig. 5. The dependence of the coefficient of friction of the PCM on the lubricant used and the test time

При трении ПКМ в среде жидких смазок коэффициент трения снижается на порядок, что объясняется нивелированием температуры в зоне контакта жидкой средой за счет эффективного отвода тепла из зоны фрикционного контакта (рис. 5). Для ПКМ с содержанием 10 мас.% повышение скорости скольжения с 0,2 до 0,5 м/с при трении в среде жидких смазок приводит к незначительному повышению температуры в зоне трибоконтакта, тогда как изменение температуры у композитов с 7 мас.% УВ довольно существенное. Это, видимо, связано с тем, что с увеличением содержания УВ, которые характеризуются высокой теплопроводностью, повышается сопротивляемость материала к сдвиговым деформациям и улучшается теплоотвод в зоне трения.

Как видно из рис. 4, при использовании в качестве смазки трансмиссионного масла SiboilTAD-17и зарегистрированы не только самые низкие значения коэффициента трения, но и при этом характер кривой зависимости от времени испытания характеризуется наибольшей стабильностью. Это связано с тем, что при использовании трансмиссионного масла образуется более прочный граничный слой, эффективно разделяющий сопрягаемые детали трибосистемы. Это, возможно, связано с наличием в этом масле целого ряда специальных антифрикционных присадок, определяющих большую прочность граничного слоя и температурную стойкость, препятствующих возникновению интенсивного изнашивания адгезионного типа, характерного при изнашивании ненаполненного ПТФЭ в режиме сухого трения [18].

При использовании индустриального и гидравлического масел в качестве смазки коэффициент трения ПКМ характеризуется нестабильностью и превышает значения 0,05, что недопустимо для антифрикционных полимерных материалов в присутствии смазки. Это свидетельствует о том, что граничный слой в этом случае теряет свою несущую роль вследствие разрушения или разориентации граничных слоев, а также изменения механических свойств контактирующих неровностей.

Далее проведены триботехнические исследования ПКМ в среде трансмиссионного масла SiboiTAD-17u при повышении нагрузки до 650 Н (табл. 3). Установлено, что при трении в таких условиях коэффициент трения ПКМ также не превышает значений, допустимых для антифрикционных полимерных материалов в присутствии смазки. Температура в зоне контакта трибосистемы не превышает 70 °С.

Из табл. 3 видно, что увеличение коэффициента трения на 0,01–0,02 приводит к повышению температуры ~ на 10 °С, что связано с деформированно-напряженным состоянием контактирующих тел в условиях трибосопряжения. Композиты с содержанием УВИС-АК-П 10 мас.% при нагрузке 650 Н характеризуются сниженными значениями коэффициента трения и температуры в зоне трения, что, возможно, обусловлено высокой теплопроводностью углеродных волокон, которые способствуют рассеиванию энергии колебаний, что снижает саморазогревание материала за счет сил внутреннего трения.

Для понимания процессов, протекающих в ходе трения разработанных ПКМ, проведены исследования поверхности полимерных материалов после трения (рис. 6) методом инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрометре Nicoletprotege 460 (США).

Пики 2923 и 2856 см^{-1} соответствуют асимметричным и симметричным валентным колебаниям группы $-\text{CH}_2-$, пик в области 2952 см^{-1} относится к асимметричным валентным колебаниям метильной группы ($-\text{CH}_3$), симметричные колебания перекрываются с пиками метиленовой группы ($-\text{CH}_2-$) [19]. Наличие метильных групп дублируется в области 1500–1350 см^{-1} в виде деформационных колебаний: пик 1460 см^{-1} относится к асимметричным деформационным колебаниям, а пик 1377 см^{-1} – к симметричным деформационным колебаниям метильной группы. Наиболее интенсивными эти пики наблюдаются на поверхностях

Таблица 3. Триботехнические показатели ПКМ при трении в трансмиссионном масле Siboi TAD-17u

Table 3. Tribotechnical indicators of PCM under friction in Siboi TAD-17u transmission oil

ПКМ	Режим		f	S, мм ²	T _п , °С
ПТФЭ+7 мас.% УВ, вальцы, 50/50	600Н	0,2 м/с	0,02	45,59	49,7
		0,5 м/с	0,02	55,75	51,5
	650Н	0,2 м/с	0,04	52,17	66,1
		0,5 м/с	0,04	60,14	68,5
ПТФЭ+10 мас.% УВ, вальцы, 50/50	600Н	0,2 м/с	0,03	47,40	53,1
		0,5 м/с	0,03	57,15	51,4
	650Н	0,2 м/с	0,02	52,86	52,2
		0,5 м/с	0,03	55,66	65,8

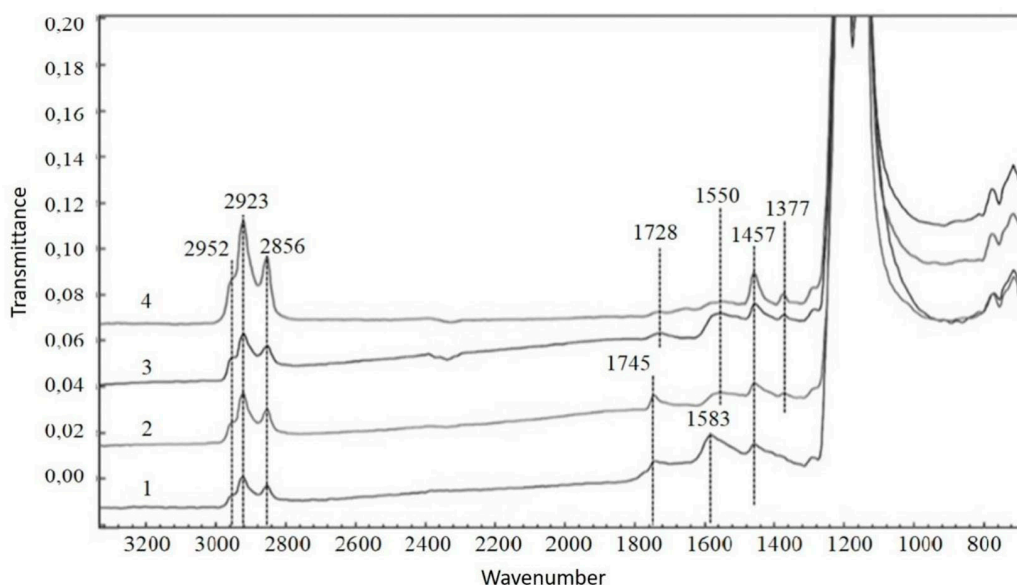


Рис. 6. ИК-спектры поверхностей трения образцов: 1) трение без смазки; 2) трение в гидравлическом масле; 3) трение в индустриальном масле; 4) трение в трансмиссионном масле

Fig. 6. IR spectra of the friction surfaces of the samples: 1) friction without lubrication; 2) friction in hydraulic oil; 3) friction in industrial oil; 4) friction in transmission oil

ПКМ после трения в среде трансмиссионного масла, что свидетельствует о формировании прочного граничного слоя.

На спектрах образца, испытанного без масла, и образца, испытанного в среде гидравлического масла, наблюдается пик при 1745 см^{-1} , в то время как у образцов, испытанных в среде трансмиссионного и индустриального масел, этот пик смещен в область низких частот и приходится на 1728 см^{-1} . Пик 1745 см^{-1} относится к валентным колебаниям карбонильной группы в предельных сложных эфирах, а пик при 1728 см^{-1} – к валентным колебаниям карбонильной группы в кетонах. Наличие пика карбонильной группы указывает на протекание окислительных процессов на поверхности образцов при трении с образованием кетонов и сложных эфиров.

Пик при 1583 см^{-1} у образца, испытанного без масел, характерен для валентных колебаний $\text{C}=\text{C}$ связи, сопряженной с карбонильной группой [20].

Пик в области 1550 см^{-1} соответствует асимметричным валентным колебаниям карбоксилат-аниона [21].

По соотношению интенсивности пиков «кристалличности» и валентных колебаний CF_2 рассчитаны значения степени кристалличности ПКМ до и после трения в зависимости от режимов трибоиспытаний (табл. 4). По изменениям значений степени кристалличности ПТФЭ и композитов с УВ можно судить о фрикционном поведении материала в процессе трения. Например, значения степени кристалличности ПКМ при повышении скорости скольжения не меняются при трении в среде трансмиссионного масла, что свидетельствует о стабильности процесса трения в этом случае, вследствие чего физико-механические свойства материалов в процессе трения не изменяются.

Таблица 4. Зависимость степени кристалличности ПТФЭ и ПКМ до и после трения от режимов трибоиспытаний

Table 4. Dependence of the degree of crystallinity of PTFE and PCM before and after friction on the modes of tribo-tests

Композит	F, Н	Режим трения			α , %
		V, м/с	среда		
ПТФЭ	до трения	-			38,0
	после трения	550 0,5	0,2	Siboil TAD-17u	36,2
				47,9	
ПТФЭ+7 мас.% УВИС-АК-П	до трения	-			43,3
	после трения	550	0,2	-	46,9
			0,5	-	52,7
			0,2	Gidrotec HLP 46	40,9
			0,5		35,4
			0,2	И-20А	49,9
			0,5		31,1
			0,2	Siboil TAD-17u	46,8
			0,5		46,9
	ПТФЭ+10 мас.% УВИС-АК-П	до трения	-		
после трения		550	0,2	-	40,5
			0,5	-	45,0
			0,2	Gidrotec HLP 46	-
			0,5		41,3
			0,2	И-20А	27,2
			0,5		39,7
			0,2	Siboil TAD-17u	43,4
			0,5		43,7

Примечание: F – нагрузка трения; V – скорость скольжения при трении; α – степень кристалличности.

Установлено, что для исходного ПТФЭ и ПКМ степень кристалличности в процессе трения меняется как в сторону уменьшения, так и в сторону повышения. Это связано с различными механизмами влияния трения на структуру полимерной матрицы: один влияет на приповерхностный слой ~10 мкм, а другой – на более глубокий слой. В последнем случае степень кристалличности может уменьшаться вследствие неравномерного локального нагрева в объеме материала. Повышение степени кристалличности связано с участием наполнителей под действием температуры и силы трения в ориентации поверхностных слоев по направлению скольжения с формированием упрочненного поверхностного слоя с высокой степенью кристалличности [22–24]. Более высокие значения степени кристалличности зарегистрированы у ПКМ после трения при скорости скольжения 0,5 м/с, что связано с более выраженным ориентационным воздействием трения на полимерные цепи, так как трибовоздействию подвергается тонкий приповерхностный слой, который легко поддается ориентации вследствие повышенного фрикционного нагрева полимерного материала.

Таким образом, показана перспективность использования технологии вальцевания порошковой композиции при получении ПКМ на основе ПТФЭ. Данные композиты показали повышенные триботехнические свойства по сравнению с композитами, полученными только с использованием совместной механоактивацией компонентов.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при использовании технологии вальцевания износостойкость композитов повышается в 4–8 раза по сравнению с композитами, полученными с использованием только совместной механоактивацией компонентов в планетарной мельнице. Это связано с тем, что использование технологии вальцевания позволяет интенсифицировать адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз и способствует снижению пористости материала.

2. Выявлено, что наибольшее влияние на процесс изнашивания полимерных композитов оказывает скорость скольжения. При сухом трении увеличение скорости скольжения приводит к повышению коэффициента трения, что ведет к существенному повышению фрикционной температуры, приводящей к интенсификации процессов изнашивания композитов в 2–3 раза.

3. При трении ПКМ в среде жидких смазок коэффициент трения снижается на порядок, что объясняется нивелированием температуры в зоне контакта с жидкой средой за счет эффективного отвода тепла из зоны фрикционного контакта. Самые низкие и стабильные показатели по коэффициенту трения, поверхностной температуре и площади дорожки трения зарегистрированы при использовании в качестве смазки трансмиссионного масла Siboil TAD-17u.

4. Установлено, что степень кристалличности ПКМ изменяется в процессе трения. Более высокие значения степени кристалличности зарегистрированы у ПКМ после трения при скорости скольжения 0,5 м/с, что связано с более выраженными ориентационными процессами поверхностного слоя вследствие повышенного фрикционного нагрева полимерного материала. Значения степени кристалличности не меняются при трении ПКМ в среде трансмиссионного масла при повышении скорости скольжения, что связано со стабильностью процесса трения.

Список литературы / References

[1] Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. *Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация*. М.: Машиностроение, 2005. 240. [Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F. *Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification*. М.: Mechanical Engineering, 2005. 240 (in Russian)]

[2] Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. *Полимерные композиционные материалы в триботехнике*. М.: Недра, 2004.262 [Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baibaratskaya M. Yu., Mamaev O. A. *Polymer composite materials in tribotechnics*. М.: Nedra, 2004. 262 (in Russian)]

[3] Богун В.С., Бахарева В.Е., Анисимов А.В. Подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков для центробежных насосов энергетических установок, *Вопросы материаловедения*, 2010, 1(61), 60–66 [Bogun V. S., Bakhareva V. E., Anisimov A. V. Sliding bearings made of

antifriction carbon fiber for centrifugal pumps of power plants, *Materials Science Issues*, 2010, 1(61), 60–66 (in Russian)]

[4] Воропаев В.В., Авдейчик С.В., Струк В.А. Технология формирования высокопрочных износостойких фторкомпозитов, *Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*, 2014, 1, 51–59 [Voropaev V. V., Avdeychik S. V., Struk V. A. Technology of formation of high-strength wear-resistant fluorocomposites, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, 2014, 1, 51–59 (in Russian)]

[5] Воропаев В.В., Барсуков В.Г. Расчетно-экспериментальная оценка пористости заготовок из пресс-композиции «ФЛУВИС 30», *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*, 2021, 11, 1, 66–74 [Voropaev V. V., Barsukov V. G. Computational and experimental evaluation of the porosity of blanks from the press composition “FLUVIS 30”, *Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 6. Technique*, 2021, 11, 1, 66–74 (in Russian)]

[6] Авдейчик С.В. и др. *Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение*. Гродно: Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, 2012, 339 [Avdeychik S. V. et al. *Mechanical engineering fluorocomposites: structure, technology, application*. Grodno: Grodno State University named after Yanki Kupala, 2012, 339 (in Russian)]

[7] Машков Ю.К., Кропотин О.В., Шилько С.В. и др. Формирование структуры и свойств антифрикционных композитов модификацией политетрафторэтилена полидисперсными наполнителями, *Материаловедение*, 2015, 1, 22–25 [Mashkov Yu.K., Kropotin O. V., Shilko S. V., et al. Formation of the structure and properties of antifriction composites by modification of polytetrafluoroethylene with polydisperse fillers, *Materials Science*, 2015, 1, 22–25 (in Russian)]

[8] Машков Ю.К., Кургузова О.А., Рубан А.С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокомпозитов. *Вестник СибАДИ*, 2018, 15(1), 36–45 [Mashkov Yu.K., Kurguzova O. A., Ruban A. S. Development and research of wear-resistant polymer nanocomposites. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2018, 15(1), 36–45]

[9] Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review. *Adv Compos Hybrid Mater*, 2018, 1, 247–268.

[10] Materials based on carbon [Electronic resource] – Access: https://studref.com/622295/prochie/materialy_osnove_ugleroda (date of access 04/29/2021).

[11] Lewis T. B., Nielsen L. E. Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites. *J. Appl. Polym. Sci*, 1970, 14(6), 1449–1471.

[12] Cheng S. C., Vachon R. I. The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969, 12(3), 249–264.

[13] Baskin Z. L., Shabalin D. A., Vyrazheikin E. S. et al. Product range, properties, and application of fluoropolymers manufactured in Kirovo-Chepetsk *Chemical Industrial Complex. Russ J Gen Chem*, 2009, 79, 527–538.

[14] Markova M. A., Petrova P. N. Development of Wear-Resistant Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Carbon Fibers of UVIS-AK-P Brand. *Materials Science Forum*, 2019, 945, 327–332.

[15] Myshkin N. K., Petrokovets M. I., Kovalev A. V. Tribology of the Polymers. Adhesion, Friction, Wear, and Frictional Transfer: A Review. *Journal of Friction and Wear*, 2006, 27(4), 62–74.

- [16] Briscoe B.J., Sinha S.K. Tribology of Polymeric Solids and Their Composites. *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, 2014, 223–267.
- [17] Lafaye S., Gauthier C., Schirrer R. Analysis of the apparent friction of polymeric surfaces. *Journal of Materials Science*, 2006, 41, 6441–6452.
- [18] Lancaster J. K., Play P., Godet M. Third body formation and the wear of PTFE fibre based dry bearings. *J. Lubric. Technol.*, 1980, 102(2), 236–246.
- [19] Liang C. Y., Krimm S. Infrared Spectra of High Polymers. III. Polytetrafluoroethylene and Polychlorotrifluoroethylene. *The Journal of Chemical Physics*, 1956, 25(3), 563–571.
- [20] Rasberger M. Oxidative degradation and stabilization of mineral oil-based lubricants. *Chemistry and Technology of Lubricants*, 1997, 98–143.
- [21] Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 2006.
- [22] KhedKar J., Negulescu I., Meletis E. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, 2002, 252, 361–369.
- [23] Shen J. T., Pei Y. T., De Hosson J. T.M. Structural changes in polytetrafluoroethylene molecular chains upon sliding against steel. *Journal Material Science*, 2014, 49, 1484–1493.
- [24] Biswas S. K., Vijayan K. Friction and wear of PTFE – a review. *Wear*, 1992, 158(1–2), 193–211.