ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

INFLUENCE OF FRICTION REGIMES ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON PTFE AND CARBON

М. А. Маркова

Marfa A. Markova

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
Якутский научный центр
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas Problems,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
Yakut Scientific Center
of the Siberian Branch
of the Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

П. Н. Петрова

Pavlina N. Petrova

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas Problems,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

А. Л. Федоров

Andrey L. Fedorov

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas Problems,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

В данной работе приведены результаты триботехнических испытаний полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и углеродного волокнистого активированного материала марки УВИС-АК-П (ООО НПЦ «УВИКОМ») в зависимости от контактного давления в режиме сухого и граничного трения в среде различных масел. В качестве жидких смазочных сред при трении полимерных материалов использованы промышленное масло марки И-20А, трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17u, гидравлическое масло марки Роснефть Hidrotec HLP 46. Для трибоиспытаний выбран полимерный композит с содержанием 5 % масс. УВИС-АК-П, полученный с использованием последовательного смешения наполнителя с ПТФЭ и технологии совместной активации компонентов в планетарной мельнице, как самый износостойкий материал по результатам предыдущих исследований. Установлено, что ненаполненный ПТФЭ несмотря на интенсивный износ при повышении контактной нагрузки при сухом трении не подвергается пластической деформации и сохраняет практически неизменным низкий коэффициент трения. Установлено, что при сухом трении композита с УВ при нагрузке 350 Н коэффициент трения проходит через минимум, что связано с переходом упругого контакта взаимодействующих элементов поверхностей металлополимерной трибосистемы в пластический при повышении нагрузки. При трении ПТФЭ в среде смазочных масел происходит существенное снижение массового износа, коэффициента трения и температуры в зоне контакта, что объясняется формированием на поверхностях трения слоев вторичных структур и значительной податливостью ПТФЭ, что увеличивает фактическую площадь трибоконтакта, снижающую величину реальных нормальных контактных напряжений. При трении полимерных композиционных материалов в среде смазочных масел также зарегистрировано снижение коэффициента трения на порядок и площади дорожки трения в 1,7–2,7 раза, при этом формоизменение, образование канавки и массовый износ практически не зарегистрированы. Выявлено, что наибольший эффект повышения износостойкости и допустимой нагрузки трения, снижения температуры в зоне трения у ПТФЭ и композита наблюдается при использовании трансмиссионного масла марки Siboil TAD-17u. Это связано с наличием в масле этой марки специальных антифрикционных присадок и снижением фактического контакта рабочей

Ключевые слова

политетрафторэтилен;
износостойкость;
коэффициент трения;
скорость массового изнашивания;
механоактивация;
углеродные волокна;
режим трения

поверхности полимерного материала со смазочным материалом, что способствует снижению интенсивности деструктивного процесса поверхностного слоя при контакте со смазкой.

The paper presents the results of tribotechnical tests of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and carbon fibrous activated material UVIS-AK-P (SPC UVIKOM LLC) depending on the contact pressure in dry and boundary friction modes in various oils. I-20A industrial oil, Siboil TAD-17u transmission oil, and Rosneft Gidrotec HLP 46 hydraulic oil were used as liquid lubricants for the friction of polymeric materials. For tribotesting, a polymer composite with a content of 5 % wt. UVIS-AK-P, obtained using sequential mixing of filler with PTFE and the technology of joint activation of components in a planetary mill, is the most wear-resistant material according to the results of previous studies. It has been established that despite the heavy wear at increased bearing pressure during dry friction, unfilled PTFE does not undergo plastic deformation and maintains a low coefficient of friction practically unchanged. It has been found that the friction coefficient passes through a minimum during dry friction of a composite with CF at a load of 350 N. It is associated with the transition of the elastic contact of the interacting elements of the surfaces of the metal-polymer tribosystem to the plastic one with increasing load. During friction of PTFE in a lubricating oil environment, a significant decrease in mass wear, friction coefficient and temperature in the contact zone are observed due to the formation of secondary structures on the friction surfaces and the significant flexibility of PTFE. This increases the actual area of the tribocontact, which reduces the value of real normal contact stresses. During friction of polymer composite materials in the environment of lubricating oils, a decrease in the friction coefficient and the area of the friction track by 1.7–2.7 times was recorded as well. Deformations, groove formation and mass wear were not observed. It has been revealed that the greatest effect of increasing the wear resistance and permissible friction load and lowering the temperature in the friction zone of PTFE and composite is observed when using Siboil TAD-17u transmission oil. This is due to the presence of special antifriction additives in this oil brand and a decrease in the actual contact of the working surface of the polymer material with the lubricant, which helps to reduce the intensity of the destructive process in the surface layer while contacting with the lubricant.

Введение

В свете активного роста интереса к освоению арктических регионов все большее значение в промышленности и народном хозяйстве приобретает научное направление по созданию морозостойких композитов триботехнического назначения. При этом одним из возможных способов повышения износостойкости полимерных материалов, используемых в узлах трения различного назначения, в том числе для эксплуатации в регионах с экстремальными климатическими условиями, является использование в качестве матриц морозостойких полимеров и их модификации углеродными волокнами, в том числе с модифицированной поверхностью для улучшения межфазных характеристик [1].

Нефтегазовый комплекс характеризуется большим числом и многообразием технических и технологических процессов, огромным количеством оборудования и сооружений.

Key words

polytetrafluoroethylene;
wear resistance; friction coefficient;
mass wear rate;
mechanical activation;
carbon fibers;
friction regime

При этом в процессе добычи, транспортировки и переработки газо- и нефтепродуктов технологии должны быть совершенными, оборудование — надежным, а от применяемых материалов требуются высокая прочность, теплостойкость, коррозионная и химическая стойкость. Этим требованиям как нельзя лучше отвечают фторполимерные композитные материалы. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) благодаря полной химической инертности и способности сохранять свои свойства в широком диапазоне температур в сочетании с устойчивостью к старению и атмосферным воздействиям делают ПТФЭ незаменимым в химической, нефтехимической и авиационной промышленности, где требования к материалам особенно высоки [2]. Они необходимы там, где нужно: увеличить износостойкость, уменьшить трение, обеспечить надежную электроизоляцию,

создать гидрофобность материалов и изделий, осуществить защиту от агрессивных сред и герметичность устройств [3]. Основными недостатками ПТФЭ являются высокий коэффициент линейного термического расширения, низкая износостойкость и способность деформироваться в нормальных условиях даже при небольших нагрузках. Для устранения этих недостатков перспективно использовать углеродные наполнители-модификаторы различной дисперсности и формы частиц.

Свойства ПКМ напрямую зависят от распределения наполнителя в матрице полимера. При неравномерном распределении наполнителя в матрице полимера образуются агломераты, которые в объеме композита являются концентраторами напряжений, по которым идет преждевременное разрушение материала, из-за чего наполненные композиты уступают по деформационно-прочностным показателям матричному полимеру [4].

В настоящее время испытания на трение чаще всего проводят с длительной приработкой трущихся поверхностей в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы подшипника скольжения. При этом в поле зрения исследователя зачастую попадают не все возможные режимы трения, и цельной картины поведения материалов при трении получить не удается.

Цель работы — исследование влияния режимов трения на износостойкость и коэффициент трения ПКМ на основе ПТФЭ и углеродных волокон УВИС-АК-П.

Материалы и методы исследований

В качестве полимерной матрицы выбран промышленно-выпускаемый политетрафторэтилен марки ПН, который относится к материалам антифрикционного назначения, которые способны функционировать и при криогенных, и при повышенных температурах (от минус 269 °С до 250 °С). В качестве наполнителя ПТФЭ использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия).

В ранее проведенных работах показана перспективность использования углеродных волокон УВИС-АК-П в качестве наполнителя ПТФЭ в количестве 5 % масс. [5]. Данный композит получали с использованием следующей технологии (рисунок 1), которая заключается в смешении всего наполнителя в части полимера, затем полученная смесь подвергается совместной механоактивации в планетарной мельнице, после чего смешивается с остальной частью полимера до необходимой концентрации наполнителя.

Рисунок 1. Этапы получения ПКМ на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон УВИС-АК-П

Данный способ показал положительное влияние на эксплуатационные свойства ПКМ, в связи с этим на данном композите проведены испытания по влиянию режимов трения на износостойкость и коэффициент трения.

Триботехнические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания) определяли на машине трения

ИИ-5018. Триботехнические испытания композитов на основе ПТФЭ проводили при нагрузке 160–450 Н при скорости скольжения вала 0,2 и 0,5 м/с. Время испытания — 3 ч. Схема трения «диск — диск» представлена на рисунке 2, а, испытание материалов в смазочной среде заключается в том, что контртело опускалось в ванну (рисунок 2, б) со смазоч-

ным материалом. Использование ванны со смазочным материалом обеспечивает возможность подпитки граничного слоя из объема смазочного материала, таким образом граничная смазка продолжает осуществляться в течение всего времени испытаний. Для достоверности сравнения в среде смазочных масел за критерий износа образцов кроме массового износа при трении принималась еще и площадь дорожки трения, т.к. при высоких нагрузках при повышении температуры в зоне контакта происходит обратный перенос частиц износа с контртела на поверхность образцов, что затрудняет корректную оценку массового износа композитов. Площадь дорожки трения вычисляли по программе ImageJ 1.46r.

Известно, что целый ряд агрегатов и механизмов в силу своего назначения работают в среде жидких смазочных масел, а полимерные детали широко используются в узлах трения в самых разных конструкциях трибосистем, смазываемых как минеральными, так синтетическими маслами. В связи с этим исследованы триботехнические характеристики полимерных материалов в условиях повышения контактной нагрузки при трении (скорость скольжения вала постоянная) в режиме сухого

трения и среде различных жидких смазочных материалов.

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

— гидравлическое масло марки Роснефть Hidrotec HLP 46 предназначено для применения в гидросистемах промышленного оборудования отечественного и иностранного производства с высокой степенью износа, работающего при высоких механических и тепловых нагрузках;

— трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17u рекомендовано для применения: в ведущих мостах легковых и в трансмиссии грузовых автомобилей. Применение этой трансмиссионной жидкости за счет использования целого ряда присадок обеспечивает легкое переключение передач трансмиссии, а также защищает шестерни и подшипники от износа. Ее особенность в том, что она разработана специально для работы в условиях высокой нагрузки и максимальных температур, чтобы обеспечить бесперебойную работу двигателя в тяжелых ситуациях;

— масла марки И-20А предназначены для применения в легко- и средненагруженных механизмах, в том числе: гидросистемах промышленных станков, строительной и дорожной техники; зубчатых передачах; направляющих качения и скольжения. Индустриальное масло И-20А относится к первой и наиболее распространенной группе нефтяных масел без присадок, которые используют в качестве рабочих жидкостей в гидравлических системах, без предъявления особых требований к эксплуатационным свойствам индустриальных масел.

Ввиду того что на данном этапе выполнения работы в процессе трения ПКМ рассмотрены низкие скорости скольжения вала (0,2 и 0,5 м/с) при растущей нагрузке, в среде жидких смазок осуществляется механизм граничного трения [6, 7].

Результаты триботехнических испытаний ПТФЭ и композитов на его основе с 5 % масс. УВИС-АК-П в зависимости от режимов трения представлены на таблице 1. ПКМ на основе ПТФЭ и 5 % масс. УВИС-АК-П для испытаний выбран исходя из ранее выполненных работ как самый износостойкий материал состава ПТФЭ-УВИС-АК-П при содержании УВ в композите от 1 % масс. до 10 % масс.

а) сухое трение; б) в режиме граничной смазки; 1 — образец для испытаний; 2 — стальное контртело; 3 — ванна со смазочным материалом
Рисунок 2. Схема трения «диск — диск»

Таблица 1. Триботехнические характеристики исходного ПТФЭ и ПКМ в режиме сухого трения и в среде смазочной среды в зависимости от контактной нагрузки

Образец	P, Н	Скорость скольжения вала, м/с	Вид смазочной среды	I, мг/ч	f	T, °C (min — max)	Объемный износ, мм ³	Площадь дорожки трения, мм ²
ПТФЭ	160	0,2	—	170,8	0,16	28,3–39,7	236,1	74,6
	200		—	221,9	0,16	27,7–38,2	306,8	81,9
	250		—	266,2	0,17	27,1–40,5	368,1	84,7
	300		—	368,1	0,17	29,0–45,7	508,9	100,7
	350		—	540,3	0,17	28,1–48,4	746,9	130,9
	350		Gidrotec HLP 46	11,6	0,04	26,5–34,7	15,3	65,7
	350		Siboil TAD-17u	0,03	0,02	28,5–30,5	0,05	28,5
	350		И-20А	19,9	0,04	30,2–38,4	27,6	82,4
ПТФЭ + 5 % масс. УВИС-АК-П	160	0,2	—	3,6	0,21	28,5–37,7	5,1	48,9
	200		—	3,7	0,13	34,3–40,8	5,2	50,8
	250		—	5,7	0,16	31,8–40,5	8,1	56,3
	300		—	7,13	0,19	29,0–42,7	10,1	64,6
	350		—	3,7	0,11	33,5–45,4	5,3	56,1
	400		—	6,3	0,13	31,3–44,8	9,0	77,4
	450		—	5,2	0,14	29,7–49,5	7,3	70,4
	450	0,5	—	9,3	0,17	29,0–69,7	13,2	82,5
	350	0,2	Gidrotec HLP 46	—	0,01	29,1–32,2	—	26,7
	350		Siboil TAD-17u	—	0,02	28,8–32,8	—	24,9
	350		И-20А	—	0,02	27,9–32,7	—	31,2
	450		Gidrotec HLP 46	—	0,02	28,5–39,3	—	43,5
	450		Siboil TAD-17u	—	0,04	28,5–39,1	—	42,6
	450		И-20А	—	0,04	28,9–39,8	—	41,2
	450	0,5	Siboil TAD-17u	—	0,02	25,0–33,9	—	44,0

Примечание.

P — нагрузка при трении, Н; I — скорость массового изнашивания, мг/ч; f — коэффициент трения; T — температура в зоне контакта, °C. Скорость скольжения вала 0,2 и 0,5 м/с.

Как видно из таблицы 1, при повышении контактного давления, оказываемого на образец, на ПТФЭ повышается скорость массового изнашивания в условиях сухого трения, при этом коэффициент трения практически не меняется. Это объясняется тем, что при трении ПТФЭ характерен интенсивный фрикционный массоперенос, вследствие чего почти сразу же формируется пленка переноса на контртеле, таким образом осуществляется режим самосмазывания. Зарегистрировано некоторое повышение температуры в зоне трения до 10 °C при повышении нагрузки. Для ненаполненного ПТФЭ нагрузку при трении максимально подняли до 350 Н, так как при такой нагрузке зарегистрировано сильное изнашивание образца.

Установлено, что при повышении контактной нагрузки от 160 до 350 Н происходит повышение скорости массового изнашивания: при нагрузке 200 Н износостойкость снижается на 30 %, при 250 Н — на 56 %, при 300 Н — в два раза, при 350 Н — в 3,16 раза по сравнению с исходным ПТФЭ при нагрузке трения

160 Н. Изнашивание исходного ПТФЭ идет интенсивно с образованием канавки на поверхности образца, по размерам которого также рассчитаны площадь истертой части (рисунок 3), используя формулу вычисления площади сегмента круга. Установлено, что ненаполненный ПТФЭ несмотря на интенсивный износ при повышении контактной нагрузки при трении не подвергается пластической деформации, о чем свидетельствует постоянство размеров по толщине образца. Это связано с высокой теплостойкостью полимера.

Значения скорости массового изнашивания рассчитаны только для ПТФЭ и ПКМ как при сухом трении, а также только для ПТФЭ при использовании смазочной среды. При изнашивании ПКМ с УВ под воздействием контактной нагрузки при трении происходят адсорбционные процессы в композите со смазочной средой, что делает невозможным корректно оценить массовый износ. Это связано с тем, что УВ марки УВИС-АК-П является сорбционно-активным углеродным

Нагрузка при трении, Н					
250 Н	300 Н	350 Н	350 Н		
Режим трения					
Сухое трение			Gidrotec HLP 46	Siboil TAD- 17u	И-20А

84,7	100,7	130,9	65,7	28,5	82,4
Площадь дорожки трения, мм²					

Рисунок 3. Фотографии изношенных образцов ПТФЭ в зависимости от режима трения с численными значениями площади дорожки трения

материалом [8]. В связи с этим для более корректного сравнения износа ПКМ рассчитаны площади дорожек трения. Объемный износ ПТФЭ и ПКМ в зависимости от режимов трения определяли по массовому износу.

Процесс трения ненаполненного ПТФЭ в среде смазочных масел проводили при нагрузке 350 Н. При этом происходит существенное снижение массового износа, коэффициента трения и температуры в зоне контакта на 10–13 °С (таблица 1). Существенное снижение скорости массового изнашивания ПТФЭ при трении в среде смазочных масел объясняется формированием на поверхностях трения слоев вторичных структур и значительной податливостью ПТФЭ, что увеличивает фактическую площадь трибоконтакта, снижающую величину реальных нормальных контактных напряжений [8, 9]. Коэффициент трения ПТФЭ при трении в среде жидкой смазки снижается на порядок, что объясняется нивелированием температуры в зоне контакта с жидкой средой за счет эффективного отвода тепла из зоны фрикционного контакта. При этом самые низкие показатели по массовому износу, коэффициенту трения и температуры в зоне контакте ПТФЭ зарегистрированы при использовании трансмиссионного масла Siboil TAD-17u в качестве смазки. В случае трения ПТФЭ в среде трансмиссионного масла Siboil TAD-17u также зарегистрировано существенное уменьшение площади дорожки трения без образования канавки (рисунок 3). Это, видимо, связано с наличием в этом масле

целого ряда специальных антифрикционных присадок, определяющих большую прочность граничного слоя и температурную стойкость, препятствующих более активному возникновению интенсивного изнашивания адгезионного типа, характерного при изнашивании ненаполненного ПТФЭ в режиме сухого трения [10–12].

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что несмотря на уникальные антифрикционные свойства ненаполненного ПТФЭ и его способность работать в узлах трения в режиме самосмазывания существенным резервом повышения его износостойкости является дополнительное применение смазочных материалов. При этом установлено, что наибольший эффект повышения износостойкости ПТФЭ наблюдается в случае использования трансмиссионного масла марки Siboil TAD-17u.

При трении ПКМ в среде смазочных масел зарегистрировано снижение коэффициента трения на порядок и площади дорожки трения в 1,7–2,7 раза (рисунок 4), что связано с формированием прочного граничного слоя в результате взаимодействия активных компонентов смазочного материала с поверхностным слоем полимерного композита. Формоизменение, образование канавки и массовый износ у ПКМ практически не регистрируются. О формировании прочного граничного слоя свидетельствует повышение интенсивности пиков, относящихся к валентным и деформационным колебаниям метильной ($-\text{CH}_3$) и

Жидкая смазочная среда					
Gidrotec HLP 46		Siboil TAD-17u		И-20А	
350 Н	450 Н	350 Н	450 Н	350 Н	450 Н

65,7	43,5	28,5	42,6	82,4	41,2
Площадь дорожки трения, мм ²					

Рисунок 4. Фотографии изношенных образцов ПКМ в зависимости от режима трения с численными значениями площади дорожки трения

метиленовых ($-\text{CH}_2-$) групп на ИК-спектрах поверхностей ПКМ после трения в среде смазочного материала.

ИК-спектры поверхностей трения ПТФЭ, испытанных в средах различных масел, в от-

личие от спектра ПТФЭ, испытанного без смазки, характеризуются наличием дополнительных пиков поглощения в областях 3275, 2928, 2860, 1746 и 1588 см^{-1} (рисунок 5).

1 — гидравлическое масло; 2 — трансмиссионное масло; 3 — промышленное масло; 4 — без масла

Рисунок 5. ИК-спектры поверхностей трения ПТФЭ в различных смазочных маслах

Широкий малозаметный пик в области 3275 см^{-1} свидетельствует о наличии $-\text{OH}$ группы. Пики 2928 и 2860 см^{-1} соответствуют асимметричным и симметричным валентными колебаниями группы $-\text{CH}_2-$, наличие которых объясняется тем, что некоторое количество масел после испытаний осталось на поверхности трения ПТФЭ. Пик 1746 см^{-1} относится к валентным колебаниям карбонильной группы $\text{C}=\text{O}$, что в совокупности с пиком 3275 см^{-1} ($-\text{OH}$) указывает на протекание окислительных процессов на поверхности ПТФЭ при трении в присутствии масел. Таким образом, одним из продуктов окисления масел на поверхности трения могут быть

карбоновые кислоты. Кроме карбоновых кислот, на поверхности трения могут находиться и непредельные кетоны или альдегиды, о наличии которых свидетельствует пик 1588 см^{-1} , характерный для валентных колебаний $\text{C}=\text{C}$ связи, сопряженной с карбонильной группой.

Показано, что во всех спектрах наблюдается малозаметный широкий пик в области 3327 см^{-1} , который свидетельствует о наличии $-\text{OH}$ группы. Пики 2925 и 2856 см^{-1} соответствуют асимметричным и симметричным валентными колебаниями группы $-\text{CH}_2-$, пик в области 2957 см^{-1} относится к асимметричным валентным колебаниям метильной группы ($-\text{CH}_3$), симметричные колебания

–CH₃ перекрываются с пиками метиленовой группы (–CH₂–). Однако при использовании метода обработки ИК-спектров «разделение

пиков» становится видно, где располагаются перекрывающиеся пики (рисунок 6).

Рисунок 6. ИК-спектр поверхности трения композита ПТФЭ + 5 % УВИС-АК-П в области 3200–2600 см^{–1} и рассчитанные методом разделения пиков (функция Лоренца) компонентные пики

Как отмечалось выше, некоторые пики в исходном спектре являются перекрытыми. Таковыми пиками, согласно полученным данным (рисунок 6), являются пики 2893 и 2872 см^{–1}, соответствующие валентным колебаниям метильной группы (–CH₃) и С–Н (третичный атом водорода) [13], что вместе с заметным наличием метильных групп указывает на разветвленность структуры углеводородов масла. Пик при 1380 см^{–1} также соответствует деформационным колебаниям метильной группы.

Пик 1725 см^{–1} относится к валентным колебаниям карбонильной группы С=О, однако по сравнению с пиком карбонильной группы исходного ПТФЭ, испытанного в присутствии масел (1746 см^{–1}), этот пик несколько смещен в длинноволновую область, что объясняется образованием дополнительных водородных связей [14]. В то же время у образца после трения без масла наблюдается пик 1744 см^{–1}, т.е. карбонильная группа в этом случае не обременена водородной связью.

Пик 1588 см^{–1}, характерный для валентных колебаний С=С связи, сопряженной с карбонильной группой, указывает на наличие на поверхности трения непредельных кетонов или альдегидов [14]. На поверхности образца до трения этот пик не проявляется, что указывает на то, что вышеперечисленные непредельные альдегиды или кетоны образуются в процессе трения.

В режиме сухого трения максимальное значение коэффициента трения, соответствующее 0,21, зарегистрировано у ПКМ в процессе

трения при нагрузке 160 Н, что, видимо, связано с возрастанием относительного вклада адгезионной составляющей коэффициента трения при малой контактной нагрузке. А по мере повышения нагрузки трения до 300 Н адгезионная составляющая коэффициента трения уменьшается, что отражается на снижении коэффициента трения у ПКМ. В процессе изнашивания ПКМ при нагрузке 350 Н коэффициент трения проходит через минимум, что связано с переходом упругого контакта взаимодействующих элементов поверхностей металлополимерной трибосистемы в пластический [1, 6] при повышении нагрузки (таблица 1, рисунок 7).

Таким образом, показана перспективность использования полимерных материалов на основе ПТФЭ в среде смазочных масел. Данные условия трения приводят к снижению коэффициента трения в 8 раз у ненаполненного ПТФЭ и в 21 раз у композита, содержащего углеродные волокна марки УВИС-АК-П, по сравнению с сухим трением.

Вывод

Проведены триботехнические исследования политетрафторэтилена и композитов с углеродными волокнами в зависимости от контактного давления в режиме сухого и граничного трения в среде различных масел. Установлено, что при трении ПКМ в среде смазочных масел зарегистрировано снижение коэффициента трения на порядок и площади дорожки трения в 1,7–2,7 раза. Выявлено, что наибольший эффект повышения износостойкости и допустимой нагрузки трения, сниже-

Рисунок 7. Зависимость коэффициента трения ПКМ от нагрузки

ния температуры в зоне трения полимерных материалов наблюдается при использовании трансмиссионного масла марки Siboil TAD-17u, что связано с наличием в нем специальных присадок, определяющих большую прочность граничного слоя и температурную стой-

кость, снижающих износ по адгезионному типу.

По результатам структурных исследований установлено протекание триботехнических реакций на поверхности зоны контакта полимера с контртелом в среде граничной смазки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сосин С.Л., Лоскутова Я.Я. Химия и технология синтетических высокомолекулярных соединений. М.: Изд-во Академия наук СССР, 1961. 816 с.
2. Материалы и изделия из ПТФЭ (фторопласта) и его модификаций и композиций // Elmatec. URL: <https://elmatec.ru/t/ftoroplast-i-ego-modifikacii> (дата обращения: 21.05.2020).
3. Бузник В.М. Фторполимерные материалы: применение в нефтегазовом комплексе. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2009. 31 с.
4. Веригин А.Н., Панферов А.А., Емельянов М.В., Незамаев Н.А. Качество смешивания многокомпонентных дисперсных материалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2015. № 31 (57). С. 75–83.
5. Markova M.A., Petrova P.N. Development of Wear-Resistant Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Carbon Fibers of RFURL UVIS-AK-P Brand // Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. P. 327–332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.327.
6. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. Основы трибологии. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
7. Komvopoulos K., Saka N., Suh N.P. The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication // Journal of Tribology. 1985. Vol. 107. No. 4. P. 452–462.
8. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
9. Рогов В.Е. Дисперсные частицы как локальные дефекты в объеме матрицы из политетрафторэтилена и их влияние на износостойкость // Вестник Бурятского

государственного университета. Химия. Физика. 2016. № 4. С. 48–51. DOI: 10.18101/2306-2363-2016-4-48-51.

10. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец Н.И. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника, 1976. 431 с.

11. Смуругов В.А., Биран В.В., Купчинов А.Б. Фрикционный перенос полимеров и его связь с молекулярными процессами в зоне контакта // Трение и износ. 1990. Т. 11. № 3. С. 521–525.

12. Lancaster J.K., Play P., Godet M. Third Body Formation and the Wear of PTFE Fibrebased Dry Bearings // Journal of Lubrication Technology. 1980. Vol. 102. No. 2. P. 236–246. DOI: 10.1115/1.3251485.

13. Казицына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. М.: Высшая школа, 1971. 264 с.

14. Чижевский А.А., Абдуллин И.Ш., Азанова А.А. Особенности ИК-спектроскопии обработанного в газовом разряде льняного материала // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 9. С. 182–184.

REFERENCES

1. Sosin S.L., Loskutova Ya.Ya. *Khimiya i tekhnologiya sinteticheskikh vysokomolekulyarnykh soedinenii* [Chemistry and Technology of Synthetic Macromolecular Compounds]. Moscow, Izd-vo Akademii nauk SSSR Publ., 1961. 816 p. [in Russian].
2. *Materialy i izdeliya iz PTFE (ftoroplasta) i ego modifikatsii i kompozitsii* [Materials and Products from PTFE (Fluoroplastic) and its Modifications and Compositions]. Elmatec. Available at: <https://elmatec.ru/t/ftoroplast-i-ego-modifikacii> (accessed 21.05.2020). [in Russian].

3. Buznik V.M. Ftoropolimernye materialy: primeneniye v neftegazovom komplekse [Fluoropolymer Materials: Application in the Oil and Gas Industry]. Moscow, «Nef't i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2009. 31 p. [in Russian].

4. Verigin A.N., Panferov A.A., Emelyanov M.V., Nezamaev N.A. Kachestvo smeshivaniya mnogokomponentnykh dispersnykh materialov [Quality of Mixing of Multicomponent Disperse Materials]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) — Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2015, No. 31 (57), pp. 75–83. [in Russian].

5. Markova M.A., Petrova P.N. Development of Wear-Resistant Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Carbon Fibers of RFURL UVIS-AK-P Brand. *Materials Science Forum*, 2018, Vol. 945 MSF, pp. 327–332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.327.

6. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. *Osnovy tribologii* [Basics of Tribology]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 664 p. [in Russian].

7. Komvopoulos K., Saka N., Suh N.P. The Mechanism of Friction in Boundary Lubrication. *Journal of Tribology*, 1985, Vol. 107, No. 4, pp. 452–462.

8. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii* [Friction, Lubrication, Wear. Physical Foundations and Technical Applications of Tribology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 368 p. [in Russian].

9. Rogov V.E. Dispersnye chastitsy kak lokal'nye defekty v ob'eme matritsy iz politetraftoretilena i ikh vliyaniye na iznosostoykost' [Disperse Particles as Local

Defects in Matrixes Volume from Polytetrafluoroethylene and their Influence on Wear Resistance]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika — Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics*, 2016, No. 4, pp. 48–51. DOI: 10.18101/2306-2363-2016-4-48-51. [in Russian].

10. Belyi V.A., Sviridenok A.I., Petrokovets N.I. *Trenie i iznos materialov na osnove polimerov* [Friction and Wear of Polymer-Based Materials]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 431 p. [in Russian].

11. Smurugov V.A., Biran V.V., Kupchinov A.B. Friktionnyi perenos polimerov i ego svyaz' s molekulyarnymi protsessami v zone kontakta [Frictional Transfer of Polymers and its Relationship with Molecular Processes in the Contact Zone]. *Trenie i iznos — Journal of Friction and Wear*, 1990, Vol. 11, No. 3, pp. 521–525. [in Russian].

12. Lancaster J.K., Play P., Godet M. Third Body Formation and the Wear of PTFE Fibrebased Dry Bearings. *Journal of Lubrication Technology*, 1980, Vol. 102, No. 2, pp. 236–246. DOI: 10.1115/1.3251485.

13. Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. *Primeneniye UF-, IK-i YaMR-spektroskopii v organicheskoi khimii* [Application of UV, IR and NMR Spectroscopy in Organic Chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 264 p. [in Russian].

14. Chizhevskii A.A., Abdullin I.Sh., Azanova A.A. Osobennosti IK-spektroskopii obrabotannogo v gazovom razryade l'nyanogo materiala [Features of IR Spectroscopy of Flaxseed Material Treated in a Gas Discharge]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 9, pp. 182–184. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Маркова Марфа Алексеевна, аспирант, инженер, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, Якутский научный центр Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Marfa A. Markova, Postgraduate Student, Engineer, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: markovamusya@mail.ru

Петрова Павлина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена и сверхмолекулярного полиэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Pavlina N. Petrova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Supermolecular Polyethylene, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: ppavlina@yandex.ru

Федоров Андрей Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Andrey L. Fedorov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: gelvirb@mail.ru