
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.892

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

© 2021 г. Е. Б. Седакова^{1,*}, Ю. П. Козырев¹¹ *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия***e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Для прогнозирования износостойкости полимерных композиционных материалов с пространственной структурой наполнителя предложен критерий триботехнической эффективности наполнения. Математическое выражение, определяющее величину критерия, содержит отношение коэффициентов трения чистого полимера и его композита. Проведены экспериментальные исследования износостойкости композита Ф4К20 и материала его матрицы – политетрафторэтилена. Применимость предложенного критерия подтверждена результатами сравнительного анализа полученных экспериментальных данных, с данными опубликованными другими авторами.

Ключевые слова: износ, коэффициент трения, интенсивность линейного изнашивания, износостойкость, композит, политетрафторэтилен

DOI: 10.31857/S0235711921030147

1. Известно [1, 2], что в чистом виде политетрафторэтилен (ПТФЭ), несмотря на его низкий коэффициент трения при отсутствии смазки и рабочий диапазон температур от -60 до $+250^{\circ}\text{C}$, редко используется в узлах трения из-за малой износостойкости. Основные причины значительного износа ПТФЭ связаны, во-первых, с высокой адгезией полимера к металлу и, как следствие этого, способностью формировать на стальных контртелах полимерные пленки переноса с последующим их разрушением и удалением продуктов износа из зоны трения [3–5]. Кроме того, ПТФЭ подвержен послойному износу, т.к. из-за низкой энергии активации сдвига ламелярных кристаллов при нагружении образуется система подповерхностных трещин [6], формирующих тонкие ленточные частицы износа [7, 8].

Известно, что для изготовления объемного материала ПТФЭ используется порошок с размерами гранул $100\text{--}150$ мкм, а для создания композитов на основе ПТФЭ в технологический процесс включают совместное перемешивание гранул ПТФЭ с частицами различных наполнителей, имеющих размеры от 10 мкм до десятков нанометров с последующим спеканием полученной смеси под давлением. Такие композиты отличаются от экструдированных тем, что в объеме полученного материала полимер и наполнитель формируют пространственную структуру, представляющую собой ячейки полимера, встроенные в каркас из частиц наполнителя. Характерно, что износостойкость композитов с такой структурой становится на $1\text{--}2$ порядка выше износостойкости чистого ПТФЭ, хотя максимальное содержание наполнителя в композите не может превышать $20\text{--}30$ об. % [1, 9].

2. Эффект наполнения не является еще до конца изученным физико-механическим процессом. В [10] разработана структурно-механическая модель износостойкости наполненных композитов, которая позволяет рассчитать величину снижения нагруженности матрицы при знании деформационных характеристик структуры наполнителя. В работах [10, 11] показано, что снижение нагруженности матрицы ведет к повышению износостойкости композита. Отсутствие фундаментальной теории создания композиционных материалов можно в ограниченной области нагрузок компенсировать расчетом износостойкости на основе феноменологических степенных соотношений [12, 13], связывающих интенсивность изнашивания с параметрами нагрузки. Характерной особенностью большинства феноменологических соотношений является то, что в них не выделяется влияние коэффициента трения на износ. Такой подход к определению износа предполагает постоянство величины коэффициента трения во всем временном диапазоне работы узла трения. Однако в [14] показано, что зависимость коэффициента трения от времени содержит низкочастотные и высокочастотные колебания. Низкочастотные колебания связаны с локальными пятнами контакта, где при адгезионном взаимодействии материалов пар трения под действием напряжений начинается рост микротрещин и образование частиц износа. В [15–17] теоретически показана связь коэффициента трения с износом, а в [18] для упругого контакта при фрикционной усталости получено соотношение, где интенсивность изнашивания и коэффициент трения связаны степенной зависимостью. В [18] приведено соотношение для определения интенсивности линейного изнашивания I_h материалов при упругом контакте и усталостном механизме изнашивания. Из этого выражения следует, что

$$I_h \approx f^t, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; t – показатель степени функции при определении числа циклов до образования частиц износа.

Из (1) следует, что величина коэффициента трения может существенно влиять на износостойкость материалов. Особенно перспективно использовать (1) применительно к композитам, т.к. изменение структуры полимерного материала при введении наполнителей может приводить к существенному изменению коэффициента трения. В то же время основной износ определяется полимерной матрицей и величина t в (1) может не зависеть от наполнения. Для создания модели износа соотношение (1) необходимо дополнить величинами контактного давления p и скорости скольжения v . В [18] отмечено, что во многих случаях показатели степени при p и v могут быть приняты за единицу. Тогда выражение для расчета величины I_h будет иметь вид

$$I_h = kf^t pv, \quad (2)$$

где k – безразмерный коэффициент.

3. Экспериментальные исследования для определения износостойкости выбранных материалов проводились на специальной облегченной установке [19], у которой вес траверсы без грузов составлял 6 Н, что давало возможность проводить испытания при малых нагрузках, характерных для работы чистых полимеров в узлах трения. Контртело из стали 45, в виде кольца с наружным диаметром 10 мм и внутренним диаметром 8 мм в процессе экспериментов контактировало с плоской поверхностью образцов – пластин, исследуемых полимерных материалов, изготовленных из ПТФЭ и Ф4К20 размером 20×25 мм и высотой 5.8 мм. Материал Ф4К20, представляет собой ПТФЭ, наполненный частицами литейного кокса с размером 5–10 мкм и концентрацией 20 об. %. Экспериментальные значения f определялись по соотношению [19], с учетом разности между произведением напряжения U и тока электродвигателя I ,

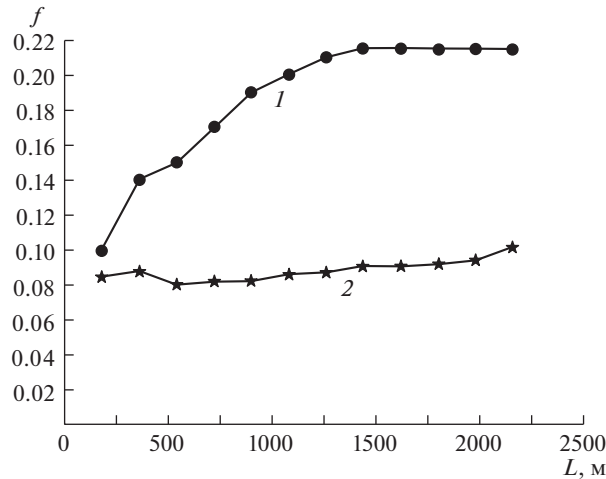


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от пути трения при $p\nu = 1$ МПа м/с для материалов: 1 – ПТФЭ и 2 – Ф4К20.

нагруженного моментом трения, и этими же величинами, измеренными в режиме холостого хода двигателя, U_{xx} и I_{xx} .

$$f = \frac{0.5(U_p I_p - U_{xx} I_{xx})}{Fr2\pi n}, \quad (3)$$

где F – нормальная нагрузка; r – средний радиус контртела; n – число оборотов вала двигателя в сек^{-1} .

Исследование износостойкости материалов проводилось при варьировании величин p и ν , так что диапазон совместной нагрузки $p\nu$ находился в пределах (0.12–3) МПа м/с, при этом величина ν принималась из диапазона (0.3–0.6) м/с. Перед каждым испытанием поверхность трения стального контртела обрабатывалась шлифовальной шкуркой с зернистостью 1000. В конце каждого испытания при заданных $p\nu$ определялся весовой износ полимерного образца Δm . Далее определялась износостойкость по величине интенсивности линейного изнашивания

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho LA}, \quad (4)$$

где L – путь трения; A – номинальная площадь контакта; ρ – плотность материала образца.

4. Для определения величины L , при которой f принимает установившееся значение, были проведены исследования зависимости коэффициента трения от пути трения при скорости $\nu = 0.6$ м/с. Результаты исследований приведены в виде графиков на рис. 1.

Коэффициент трения ПТФЭ (рис. 1) существенно зависит от величины L в области малых его значений. В то же время величина f для Ф4К20 не показывает такой зависимости от L .

В связи с тем, что ПТФЭ сильно изнашивается, продолжительность опытов должна определяться двумя основными факторами. Во-первых, не следует допускать затрудненного удаления частиц износа из зоны трения, т.е. при выбранном пути трения канавка износа не должна заглубляться на величину большую половины толщины об-

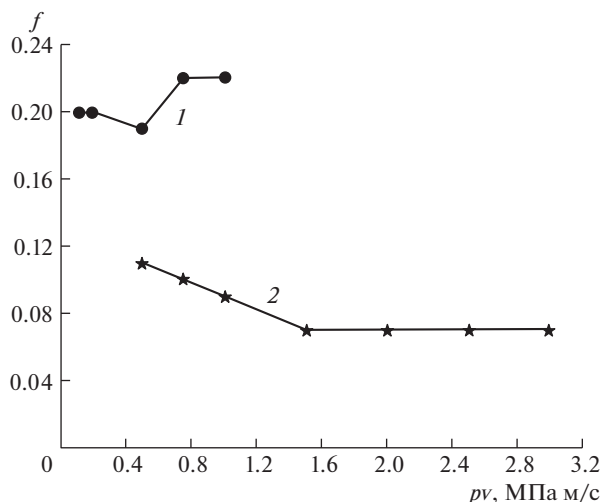


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от величины pv : 1 – для ПТФЭ; 2 – Ф4К20.

разца. С другой стороны температурный режим в зоне трения должен приближаться к стационарному, т.е. к такому режиму, когда полимерный образец будет иметь равномерную температуру по всему объему при заданном pv .

Стационарный температурный режим (рис. 1), при котором наблюдается стабилизация величины f , достигается при минимальном $L = 1000$ м. В дальнейших испытаниях будем использовать полученное значение L .

На рис. 2 приведены значения f , рассчитанные по (3) для исследованных материалов в зависимости от pv . Ф4К20 имеет коэффициент трения во всем диапазоне нагрузок в 2–3 раза ниже, чем ПТФЭ (рис. 2). Таким образом, используя значения f (рис. 2), при знании величины t , можно оценить по (2) износостойкость испытанных материалов. Для ПТФЭ в [18] было экспериментально получено, что $t = 5$. Т.к. композиты на основе ПТФЭ приблизительно на 80 об. % состоят из ПТФЭ, то для качественного анализа износостойкости композитов можно также принять $t = 5$.

В табл. 1 приведены величины интенсивности линейного изнашивания I_h , определенные по (4).

Средний износ ПТФЭ (табл. 1) существенно выше износа Ф4К20. Эти результаты хорошо согласуются с (2), т.к. значения f для ПТФЭ выше, чем для Ф4К20 (рис. 2). Исследования износостойкости Ф4К20 возможно проводить и в более широком диапазоне нагрузок, в то же время максимальная величина pv для ПТФЭ при выбранной схеме трения ограничена глубиной канавки износа.

Для оценки численного значения величины k решим (2) относительно коэффициента k , подставив значения I_h из табл. 1 для заданных pv , тогда

$$k = \frac{I_h}{f^t pv}. \quad (5)$$

Результаты вычислений k приведены в табл. 2.

Разброс величин k_1 и k_2 для каждого из исследуемых материалов незначителен (табл. 2). Тогда можно использовать средние значения k_1 и k_2 для определения по (2) расчетных значений интенсивности линейного изнашивания ПТФЭ и Ф4К20 при $t = 5$.

Таблица 1. Величины интенсивности линейного изнашивания материалов ПТФЭ и Ф4К20, рассчитанные, при различных значениях $p\nu$

$p\nu$, МПа м/с	I_h , рассчитанная по (4)	
	ПТФЭ	Ф4К20
0.12	3.28549E-07	—
0.19	1.66188E-06	3.5E-08
0.50	5.93301E-07	2.07337E-08
0.75	2.41148E-06	1.75439E-08
1.01	2.53907E-06	1.91388E-08
1.51	—	2.71132E-08
2.01	—	3.50877E-08
2.51	—	5.26316E-08
3.00	—	5.58214E-08

Таблица 2. Результаты вычислений k по (5) для исследованных материалов

$p\nu$, МПа м/с	Величина k , рассчитанная по (5) для материалов		Относительная величина $H = k_1/k_2$
	ПТФЭ, k_1	Ф4К20, k_2	
0.50	0.005	0.0025	2.0
0.75	0.006	0.0023	2.6
1.01	0.005	0.0030	1.7
Среднее значение	0.0056	0.0028	2.025

Для рассмотренных нагрузок величина $H \approx 2$ (табл. 2). Постоянство значений t и k дает возможность использовать (2) для оценки триботехнической эффективности наполнения материала ПТФЭ в диапазоне рассмотренных нагрузок по соотношению

$$D = H \frac{f_p^t}{f_f^t}, \quad (6)$$

где D — критерий эффективности наполнения композита; $H = k_1/k_2$; f_p — коэффициент трения ПТФЭ; f_f — коэффициент трения Ф4К20.

В качестве примера рассмотрим возможность применения (6) для оценки эффективности наполнения. Используем данные графиков рис. 2, например, при $p\nu = 1$ МПа м/с. Получаем, что при этой нагрузке ПТФЭ имеет $f_p = 0.22$ и Ф4К20 — $f_f = 0.09$. Тогда из (6) находим $D = 132.5$, при $H = 2$, т.е. при $p\nu = 1$ МПа м/с интенсивность линейного изнашивания Ф4К20 меньше в 132.5 раза по сравнению с интенсивностью линейного изнашивания ПТФЭ, что свидетельствует о триботехнической эффективности наполнения ПТФЭ 20 об. % литейного кокса. Таким образом, знание величины D позволяет оценить износостойкость наполненного композита по сравнению с чистым ПТФЭ без дополнительного проведения трудоемких и менее точных исследований износа.

5. Настоящая статья опиралась на выводы из усталостной теории износа для упругого контакта [18]. При этом экспериментальные исследования проводились на установке, реализующей схему трения “плоский полимерный образец—стальное кольцо”. Ранее было показано, что при такой схеме трения в полимерном материале в подпо-

Таблица 3. Величины коэффициента трения f , полученные в [21] при различных контактных нагрузках по схеме испытаний стальной палец по диску для ПТФЭ и композита Valflon F115

Нагрузка, Н	Контактное давление, МПа	Коэффициент трения исследованных материалов	
		ПТФЭ, f_{p1}	Valflon F115, f_v
5	5	0.19	0.12
10	6	0.21	0.13
20	7	0.22	0.16
30	9	0.21	0.17
Среднее значение коэффициента трения материалов		0.21	0.15

верхностном слое образуются усталостные трещины [6]. Для возможности анализа большего объема экспериментальных данных следует рассмотреть результаты других авторов, полученные на установках, реализующих схемы трения близкие к схеме “кольцо—плоскость”.

При изучении адгезионного изнашивания более информативной схемой трения является схема “палец—по диску”, в которой пальчиковый образец является полимером или композитом, а диск металлическим контртелом. При изнашивании по схеме трения “палец—по диску” износ происходит по дорожке трения, на которой образуется слой переноса полимерного материала или композита. При этом слой переноса периодически охлаждается, контактируя с окружающей средой. Это может приводить к его растрескиванию и образованию частиц износа. При подобной схеме коэффициент трения может вести себя иным образом и его связь с износом может иметь другой характер. При большом объеме слоя переноса коэффициент трения может снижаться, а износ при этом будет расти. Такие данные приведены в [20], где при снижении коэффициента трения композита на основе полифениленсульфида, наполненного наночастицами окиси алюминия, его износостойкость существенно снижается. Таким образом, важно, какая выбрана схема трения в соответствии задачам исследований.

В работе [21] были выполнены сравнительные экспериментальные исследования износостойкости материалов, используя схемы трения, которые способствуют поверхностному деформированию, как и схема “кольцо—плоскость”, реализованная при проведении наших экспериментов. Этими схемами являлись металлический палец по полимерному диску, упорная шайба по плоскости и схема, реализующая возвратно-поступательное движение, “плоскость—плоскость”. В качестве материалов для испытаний в [19] были выбраны ПТФЭ и коммерческий материал Valflon F115, представляющий собой ПТФЭ, наполненный 15 вес. % порошка полиимида с размерами частиц от 20 до 100 мкм. В [21] коэффициент трения определялся по схеме “палец—по диску”, а износ по схеме упорная шайба по плоскости. Используем данные, приведенные в [21], для расширения базы независимых экспериментальных данных.

В табл. 3 приведены величины коэффициентов трения ПТФЭ и Valflon F115, взятые из [21].

Коэффициент трения композита (табл. 3) существенно ниже, как и было отмечено в наших экспериментах. Т.к. контактное давление при проведении экспериментального исследования износостойкости ПТФЭ и Ф4К20 не превышало 6 МПа, для дальнейших расчетов из табл. 3 выбираем значения $f_{p1} = 0.21$ для ПТФЭ и $f_v = 0.13$ для Valflon F115, определенные при $p = 6$ МПа. Далее рассчитаем величины I_h исследованных в [21] материалов, на основе данных, полученных при испытаниях материалов по схеме шайба по плоскости. Эти данные приведены в табл. 4.

Таблица 4. Величины I_h материалов ПТФЭ и Valflon F115 в зависимости от $p\nu$, полученные при их изнашивании по схеме шайба по плоскости

Нагрузка $p\nu$, МПа м/с	Величины I_h , определенные для материалов	
	ПТФЭ	Valflon F115
0.045	1.78×10^{-7}	0.77×10^{-8}
0.100	0.69×10^{-7}	3.20×10^{-9}

Таблица 5. Величины коэффициентов k , определенные по (5) и использованием данных, приведенных в [21]

Нагрузка $p\nu$, МПа м/с	Величины k , рассчитанные по (5) для материалов		$H = k_1/k_2$
	ПТФЭ, k_1	Valflon F15, k_2	
0.045	0.009	0.005	1.8
0.100	0.002	0.001	2.0

Для ПТФЭ (табл. 4) величины I_h близки к величинам I_h , приведенным в табл. 1. Очевидно, что ПТФЭ, наполненный полиимидом, имеет более высокую износостойкость. Воспользуемся соотношением (5) для нахождения величин k_1 и k_2 для этого случая. Результаты расчетов (табл. 5) показывают, что и в рассматриваемом случае для дальнейших вычислений возможно принимать $H \approx 2$.

Подставив соответствующие величины коэффициента трения ПТФЭ и Valflon F115 из табл. 3 в (6), получим $D_1 \approx 21$. Сравнивая полученные величины D и D_1 , получаем, что $D \gg D_1$. Таким образом, можно сделать вывод, что литейный кокс является более эффективным наполнителем для ПТФЭ, чем мелкодисперсный полиимид. Это может быть связано с тем, что в материале Valflon F115 частицы наполнителя имеют достаточно крупный размер, сравнимый с гранулами ПТФЭ, и, по-видимому, при таком соотношении размеров имеющаяся в композите Valflon F115 пространственная структура имеет большую дефектность [10].

Выводы. 1. У модифицированных полимеров имеющих пространственную структуру, состоящую из ячеек полимера, отделенных каркасом из частиц наполнителя, экспериментальным путем зарегистрировано снижение величины коэффициента трения по сравнению с чистым полимером, что приводит к существенному повышению их износостойкости. **2.** Предложен критерий триботехнической эффективности наполнения ПТФЭ. **3.** Показана однотипность механизмов изнашивания ПТФЭ и композитов на его основе при различных нагрузках. **4.** На основе анализа различных схем трения выбраны схемы трения, пригодные для исследования усталостных явлений при трении полимерных материалов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
2. Scheirs J. Modern fluoropolymers. New York: Wiley, 1997.
3. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E.I. Sliding wear behavior of PTFE composites // Wear. 2002. V. 252. P. 361.

4. *Sawyer W.G., Freudenberg K.D., Bhimaraj P., Schadler L.S.* A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles // *Wear*. 2003. V. 254. P. 573.
5. *Kowandy C., Richard C., Chen Y.M.* Characterization of wear particles for comprehension of wear mechanisms case of PTFE against cast iron // *Wear*. 2008. V. 265. P. 1714.
6. *Blanchet T.A., Kennedy F.E.* Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites // *Wear*. 1992. V. 153. № 1. P. 229.
7. *Bahadur S.* The development of transfer layers and their role in polymer tribology // *Wear*. 2000. V. 245. № 1–2. P. 92.
8. *Conte M., Igartua A.* Study of PTFE composites tribological behavior // *Wear*. 2012. V. 296. P. 568.
9. *Liu P., Huang T., Lu R., Li T.* Tribological properties of modified carbon fabric/ polytetrafluoroethylene composites // *Wear*. 2012. V. 289. P. 17.
10. *Козырев Ю.П., Седякова Е.Б.* Влияние особенностей структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена на снижение нагруженности матрицы // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 2. С. 40.
11. *Friction and wear of polymer composites*. Edited by *K. Friedrich*. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 1986. 420 p.
12. *Добычин Н.М., Морозов А.В., Никулин А.В., Сачек Б.Я., Анисимов А.В.* Планирование эксперимента при исследовании триботехнических характеристик фенольных углепластиков // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 1. С. 186.
13. *Rhee S.K.* Wear equation for polymers sliding against metal surfaces // *Wear*. 1970. V. 16. № 6. P. 431.
14. *Фадин Ю.А., Булатов В.П., Киреенко О.Ф.* Взаимосвязь износа и энергозатрат при трении металлов в отсутствии смазочного материала // *Трение и износ*. 2002. Т. 23. № 5. С. 566.
15. *Bera B.* Adhesion friction theory of micromechanical surface contact // *IOSR Journal of engineering*. 2013. V. 3. № 2. P. 38.
16. *Васильев Ю.П., Фуголь В.А.* Математическая модель трения и изнашивания поликристаллических твердых тел // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 1 (57). С. 194.
17. *Bera B.* Interrelation of friction-wear and mechanism of energy dissipation for MEMS application // *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*. 2016. V. 6. № 8. P. 14.
18. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 528 с.
19. *Седякова Е.Б., Козырев Ю.П.* Тепловая нагруженность полимера в паре трения политетрафторэтилен—сталь // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 5. С. 386.
20. *Shwartz S.J., Bahadur S.* Studies on the tribological behavior and transfer film – counterface bond strength for polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles // *Wear*. 2000. V. 237. P. 261.
21. *Mazza L., Trivella A., Grassi R., Malucelli G.* A comparison of the relative friction and wear responses of PTFE and a PTFE-based composite when tested using three different types of sliding wear machines // *Tribology International*. 2015. V. 90. P. 15.