

УДК 539.43



Л.И. Огородов¹, В.А. Шапкина²

¹Санкт-Петербургский

политехнический университет Петра Великого

²Вологодский государственный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ ФТОРОПЛАСТА О ФТОРОПЛАСТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЯДА ФАКТОРОВ

Представлены результаты исследования коэффициента трения покоя и движения фторопласта по фторопласту (Ф-4) в зависимости от величины удельного давления, скорости смещения, взаимного смещения пластин относительно друг друга и температуры опытов, а также от загрязнения зоны контакта и многоцикловых смещений.

Коэффициент трения, фторопласт, удельное давление, скорость и величина смещения, температура.

Введение

Практический интерес представляют устройства скользящих опор для опорных частей мостов в дорожном строительстве, путепроводов, а также под трубопроводы разного назначения. Фторопластовые прокладки антифрикционных устройств обеспечивают существенное снижение коэффициента трения в опорах. Прокладки разработаны чаще всего в виде двух слоев фторопластовых пластин, соединенных в единый пакет, устанавливаемый на ригель опоры в местах опирания в соответствии с требованиями по монтажу.

По ряду показателей трения и изнашивания применение полимерных материалов позволяет обеспечить технико-экономическую эффективность машин и элементов конструкций. Антифрикционные свойства полимерных материалов зависят от целого ряда факторов [1–5]. Актуальным является определение величин коэффициента трения и износа пар трения при работе в эксплуатационных и в экстремальных условиях.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования коэффициента трения покоя и движения, а также деформаций сопряженных фторопластовых прокладок (вторичный фторопласт Ф-4 по ТУ 6-05-1088-85) в диапазоне параметров: удельное давление (p) от 2,5 до 8,0 Мпа; скорость смещения прокладок относительно друг друга (V)

от 0,04 мм/мин до 1,0 мм/мин. Исследуется влияние температуры опытов на коэффициент трения покоя и движения фторопластовых прокладок.

Оборудование и методика испытаний

Для проведения комплексных исследований работы фторопластовых прокладок была разработана на базе испытательной машины FPZ-100/1 установка, оснащенная приборами и деталями оснастки и позволяющая определить влияние различных факторов на величину коэффициента трения. Захваты машины были оснащены гидравлической системой, позволяющей осуществить прижат фторопластовых пластин с заданным усилием.

Точность величины силы прижатия фторопластовых прокладок оценивалась в 5 % номинального значения силы.

Сдвигающая сила в прокладках задавалась подвижным захватом машины, в котором закреплялось приспособление. Фторопластовые прокладки толщиной 3 и 4 мм прямоугольной формы и различной площадью ($30 \times 100 \text{ мм}^2$ и $100 \times 100 \text{ мм}^2$) были выбраны для экспериментов с учетом реальных условий эксплуатации прокладок серии А 3375-ТТИ-2.1. Диаграммы (рис. 1) зависимости силы сдвига прокладок от величины взаимного смещения с различными скоростями записывались с помощью электромагнитного датчика и двухкоординатного самописца.

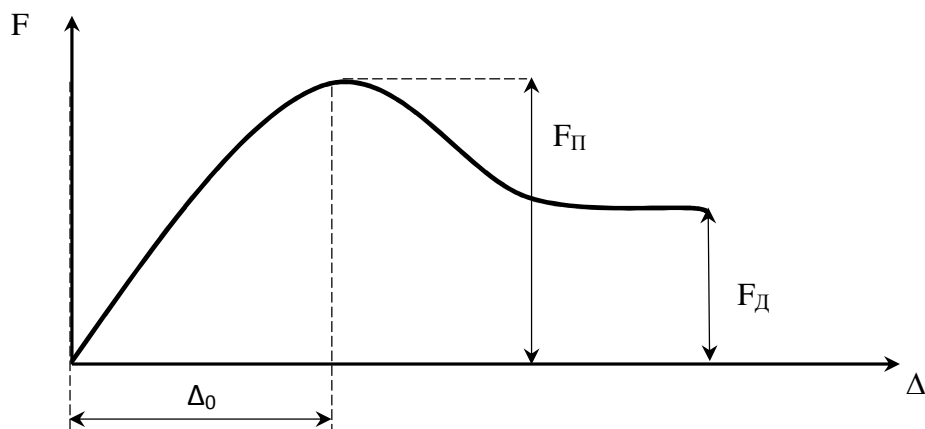


Рис. 1. Пример диаграммы зависимости сдвигающей силы от взаимного смещения пар трения

Усилия прижатия прокладок (соответствующие удельные давления) задавались согласно плану экспериментов. Погрешность определения коэффициентов трения (при температуре 20 °С) покоя и движения (при смещении прокладок на 1 мм) определена в зависимости от удельного давления на прокладки (табл. 1).

В ходе опытов определены величины относительной деформации сжатия фторопластовых прокладок в зависимости от удельного на них давления (рис. 2).

Различия в значениях деформации (заштрихованная зона на рис. 2) объясняются различным рельефом поверхностей контактирующих пластин и разбросом механических свойств фторопласта при сжатии.

По диаграммам зависимости сдвигающей силы от взаимного смещения пар трения определялись значе-

ния предварительного сдвига (Δ_0) прокладок, после которого начиналось движение прокладок относительно друг друга в зависимости от удельного давления и скорости смещения (табл. 2).

Таблица 1

Значение погрешности определения коэффициента трения в зависимости от величины удельного давления

Удельное давление, МПа	Погрешность определения коэффициента трения	
	покоя	движения
1,0	6,2	7,5
2,5	3,3	3,8
4,0	2,4	2,8
6,0	2,1	2,5
8,0	1,8	2,2

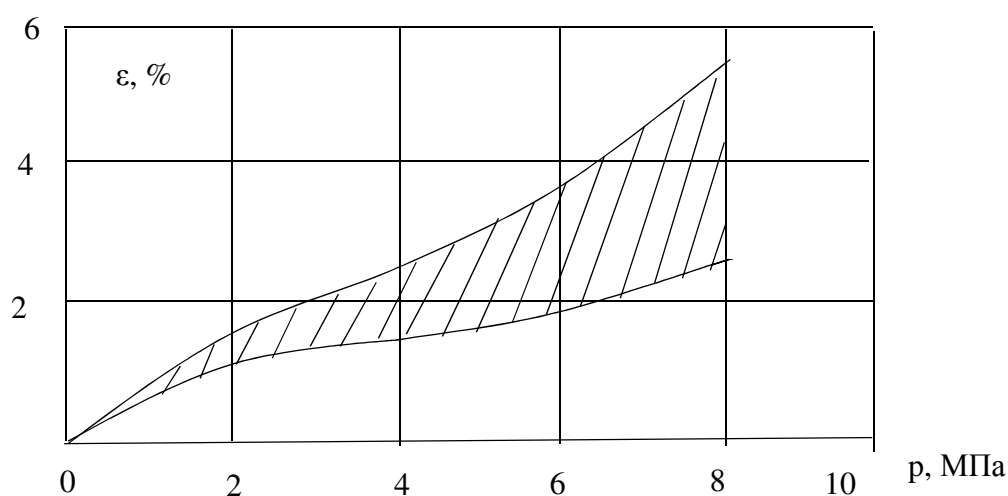


Рис. 2. Зависимость относительной деформации сжатия различных пар контактирующих прокладок от величины удельного давления

Таблица 2

Значения величин предварительного сдвига прокладок в зависимости от скорости смещения и удельного давления

Скорость смещения V, мм/мин	Значения величин предварительного смещения (Δ_0 , мм) при удельном давлении на прокладки (p, МПа)						
	1,0	2,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
0,04	0,06	0,08	0,12	0,14	0,14	0,10	0,18
0,06	0,04	0,07	0,10	0,12	0,08	0,11	0,12
0,08	0,10	0,05	0,10	0,14	0,06	0,09	0,09
0,10	0,05	0,06	0,08	0,11	0,10	0,13	0,17
0,30	0,10	0,11	0,15	0,08	0,09	0,12	0,14
0,50	0,15	0,13	0,10	0,05	0,06	0,07	0,04
0,75	0,08	0,12	0,15	0,10	0,16	0,13	0,10
1,00	0,11	0,08	0,12	0,18	0,11	0,10	0,15

Влияние удельного давления и скорости смещения прокладок на величину Δ_0 , которая изменялась от 0,04 до 0,18 мм при среднем значении Δ_0 в 0,10 мм, выявить не удалось. Можно предположить, что разброс значений Δ_0 связан с влиянием параметров поверхности различных прокладок.

Средние значения (по трем опытам) коэффициента трения покоя и движения в зависимости от удельного давления и скорости смещения прокладок при температуре 20 °С приведены в таблице 3, где в числителе дробы указан коэффициент трения покоя, отвечающий максимальной сдвигающей силе (F_{Π}), в знаменателе – коэффициент трения последующего движения, определенный по величине $F_{\text{д}}$ (рис. 1) при величине смещения, равной одному миллиметру.

В отношении высоких коэффициентов трения при малых силах взаимного прижатия прокладок можно отметить следующее: при малых силах прижатия

сдвигающая сила так же мала, и на небольшой величине этой силы могут сказываться такие факторы, как начальное прилипание прокладок к друг другу (которое должно быть преодолено при сдвиге); сопротивление отдельных неровностей на поверхности прокладок и, быть может, какие-либо другие факторы, которые трудно предусмотреть.

Далее представлены результаты по оценке влияния на коэффициент трения фторопластовых прокладок величины взаимного смещения их в пределах от 1 до 300 мм при скоростях смещения V 0,04 мм/мин, 0,05 мм/мин, 1,0 мм/мин при температуре 20 °С в зоне контакта. Длительные опыты проводились в условиях изменения направления перемещения и остановок перемещений без снятия нагрузки сжатия прокладок.

В таблицах 4–6 приведены значения коэффициента трения движения $f_{\text{д}}$ фторопласта по фторопласту в зависимости от величины взаимного смещения.

Таблица 3

Значения коэффициентов трения покоя и движения в зависимости от удельного давления и скорости смещения прокладок при температуре 20 °С

Скорость смещения V , мм/мин	Значения коэффициента трения покоя и движения при удельном давлении, МПа (20 °С)					
	2,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
0,04	$\frac{0,181}{0,108}$	$\frac{0,141}{0,092}$	$\frac{0,126}{0,075}$	$\frac{0,125}{0,081}$	$\frac{0,102}{0,070}$	$\frac{0,088}{0,062}$
0,06	$\frac{0,190}{0,142}$	$\frac{0,188}{0,102}$	$\frac{0,165}{0,084}$	$\frac{0,142}{0,078}$	$\frac{0,102}{0,071}$	$\frac{0,103}{0,068}$
0,08	$\frac{0,168}{0,106}$	$\frac{0,125}{0,092}$	$\frac{0,102}{0,087}$	$\frac{0,099}{0,069}$	$\frac{0,092}{0,081}$	$\frac{0,086}{0,077}$
0,1	$\frac{0,150}{0,108}$	$\frac{0,122}{0,088}$	$\frac{0,108}{0,093}$	$\frac{0,100}{0,058}$	$\frac{0,120}{0,076}$	$\frac{0,101}{0,084}$
0,3	$\frac{0,164}{0,098}$	$\frac{0,099}{0,071}$	$\frac{0,097}{0,059}$	$\frac{0,088}{0,052}$	$\frac{0,102}{0,059}$	$\frac{0,088}{0,052}$
0,5	$\frac{0,141}{0,074}$	$\frac{0,097}{0,058}$	$\frac{0,084}{0,048}$	$\frac{0,064}{0,043}$	$\frac{0,054}{0,038}$	$\frac{0,055}{0,039}$
0,75	$\frac{0,190}{0,102}$	$\frac{0,122}{0,082}$	$\frac{0,102}{0,087}$	$\frac{0,100}{0,078}$	$\frac{0,089}{0,072}$	$\frac{0,086}{0,077}$
1,00	$\frac{0,113}{0,086}$	$\frac{0,168}{0,092}$	$\frac{0,198}{0,102}$	$\frac{0,092}{0,057}$	$\frac{0,088}{0,046}$	$\frac{0,126}{0,083}$

Таблица 4

Значения коэффициента трения движения фторопласта по фторопласту в зависимости от величины взаимного смещения и удельного давления при скорости 0,04 мм/мин

Удельное давление, МПа	Значение коэффициента трения фторопласта при величине взаимного смещения Δ (мм) со скоростью 0,04 мм/мин							
	1	5	25	50	100	150	200	300
2,5	0,108	0,096	0,092	0,086	0,082	0,076	0,078	0,075
4,0	0,092	0,088	0,082	0,076	0,074	0,072	0,073	0,072
5,0	0,075	0,066	0,067	0,066	0,064	0,065	0,066	0,066
6,0	0,081	0,078	0,076	0,075	0,075	0,072	0,070	0,068
7,0	0,070	0,062	0,062	0,058	0,054	0,052	0,052	0,052
8,0	0,062	0,058	0,054	0,050	0,046	0,042	0,043	0,040

Значения коэффициента трения движения фторопласта по фторопласту в зависимости от величины взаимного смещения и удельного давления при скорости 0,5 мм/мин

Удельное давление, МПа	Значение коэффициента трения фторопласта при величине взаимного смещения Δ (мм) со скоростью 0,5 мм/мин							
	1	5	25	50	100	150	200	300
2,5	0,074	0,055	0,031	0,030	0,029	0,028	0,025	0,025
4,0	0,058	0,051	0,039	0,038	0,036	0,034	0,031	0,030
5,0	0,048	0,042	0,031	0,030	0,028	0,026	0,026	0,026
6,0	0,043	0,040	0,033	0,031	0,030	0,029	0,028	0,028
7,0	0,038	0,034	0,030	0,028	0,026	0,025	0,025	0,025
8,0	0,039	0,037	0,029	0,029	0,028	0,026	0,026	0,026

Таблица 6

Значения коэффициента трения движения фторопласта по фторопласту в зависимости от величины взаимного смещения и удельного давления при скорости 1,0 мм/мин

Удельное давление, МПа	Значение коэффициента трения фторопласта при величине взаимного смещения Δ (мм) со скоростью 1,0 мм/мин							
	1	5	25	50	100	150	200	300
2,5	0,086	0,076	0,072	0,068	0,064	0,062	0,062	0,062
4,0	0,092	0,082	0,078	0,072	0,065	0,062	0,060	0,060
5,0	0,102	0,090	0,088	0,082	0,080	0,078	0,080	0,078
6,0	0,057	0,052	0,048	0,046	0,044	0,043	0,042	0,041
7,0	0,046	0,044	0,042	0,041	0,040	0,039	0,038	0,038
8,0	0,083	0,060	0,056	0,052	0,048	0,044	0,042	0,042

Коэффициент трения движения f_d при смещении Δ фторопластовых прокладок на 5 мм снизился (при всех трех скоростях испытаний и без учета влияния величины удельного давления) в среднем в 1,1 раза, а при смещении на 300 мм – в 1,3...1,8 раза по сравнению с коэффициентом трения, определенным при смещении на 1 мм. Данный эффект связан, по-видимому, в основном с постепенным выглаживанием (изменением характеристик) контактирующих поверхностей.

С целью оценки разброса экспериментальных значений (табл. 4–6 и табл. 3) коэффициента трения проводилось сопоставление (вне зависимости от величины удельного давления) отношения $k = f_d^{max} / f_d^{min}$ максимального к минимальному значению коэффициента трения в зависимости от скорости и величины смещения прокладок. Наибольшая средняя величина соотношения $k=2,1$ наблюдается при наибольшей скорости (1 мм/мин) смещения.

При смещении в диапазоне от 5 до 300 мм отношение k изменялось незначительно относительно среднего значения $k=1,7$. Разброс значений коэффициента трения уменьшается по мере увеличения относительного смещения фторопластовых прокладок.

В опытах, результаты которых приведены в таблицах 3–6, контактирующие пластины из фторопласта имели прямоугольную форму, причем одна из пла-

стин имела площадь значительно большую, чем другая (I схема контактирования).

При контактировании пластин под нагрузкой имело место вдавливание одной пластины в другую, на пути смещения пластины меньшего размера на другой пластине образовывалась локальная зона деформации. С целью оценки влияния данного явления на значение коэффициента трения проводились опыты по другим схемам контактирования пластин.

Согласно II схеме контактирования пластина меньшего размера имела скругленную по высоте форму краевой зоны контактирующей части. По следующей схеме (III) прокладки выбирались одной площади контакта. Опыты проводились при скорости смещения 1 мм/мин. Коэффициент трения движения определялся при относительном смещении прокладок на 1 мм. Результаты опытов (по 2–3 образцам, испытанным в одинаковых условиях) приведены в таблице 7, где в числителе дроби указан коэффициент трения покоя, отвечающий максимальной сдвигающей силе, а в знаменателе – коэффициент трения движения определенный по величине сдвигающей силы при относительном смещении фторопластовых пластин на 1 мм.

По данным таблицы 7 можно видеть то, что имеет место влияние краевого эффекта на значение коэффициента трения.

Таблица 7

**Значение коэффициента трения покоя и движения фторопластовых прокладок
в зависимости от схем контактирования при различных удельных давлениях**

Схема контактирования	Значение коэффициента трения покоя и движения фторопластовых прокладок при удельном давлении (МПа)					
	2,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
I	<u>0.13</u> 0.086	<u>0.168</u> 0.092	<u>0.198</u> 0.102	<u>0.092</u> 0.057	<u>0.088</u> 0.046	<u>0.126</u> 0.083
II	<u>0.184</u> 0.111	<u>0.131</u> 0.090	<u>0.107</u> 0.075	<u>0.092</u> 0.066	<u>0.082</u> 0.060	<u>0.079</u> 0.060
III	<u>0.135</u> 0.086	<u>0.101</u> 0.070	<u>0.100</u> 0.060	<u>0.074</u> 0.045	<u>0.076</u> 0.046	<u>0.069</u> 0.045

Таблица 8

**Значения коэффициента трения покоя и движения фторопластовых прокладок
в зависимости от удельного давления и температуры**

V, мм/мин	T, °C	Удельное давление p, МПа					
		2,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
0,5	20	<u>0.141</u> 0,074	<u>0.097</u> 0,058	<u>0.084</u> 0,048	<u>0.064</u> 0,043	<u>0.054</u> 0,038	<u>0.055</u> 0,039
	65	<u>0.092</u> 0,068	<u>0.072</u> 0,051	<u>0.055</u> 0,040	<u>0.048</u> 0,034	<u>0.043</u> 0,031	<u>0.039</u> 0,028
	135	<u>0.045</u> 0,039	<u>0.035</u> 0,030	<u>0.030</u> 0,026	<u>0.026</u> 0,022	<u>0.025</u> 0,024	<u>0.027</u> 0,026
	200	<u>0.042</u> 0,031	<u>0.038</u> 0,027	<u>0.025</u> 0,023	<u>0.022</u> 0,021	-	-
	260	<u>0.069</u> 0,049	<u>0.037</u> 0,030	<u>0.023</u> 0,023	<u>0.028</u> 0,031	-	-
1,0	-30	<u>0.123</u> 0,10	<u>0.097</u> 0,084	<u>0.108</u> 0,082	<u>0.090</u> 0,072	<u>0.089</u> 0,067	<u>0.096</u> 0,070
	0	<u>0.102</u> 0,078	<u>0.086</u> 0,067	<u>0.087</u> 0,060	<u>0.076</u> 0,052	<u>0.070</u> 0,048	<u>0.074</u> 0,052
	20	<u>0.113</u> 0,086	<u>0.168</u> 0,092	<u>0.198</u> 0,102	<u>0.092</u> 0,057	<u>0.088</u> 0,046	<u>0.126</u> 0,083
	35	<u>0.110</u> 0,080	<u>0.083</u> 0,058	<u>0.067</u> 0,051	<u>0.058</u> 0,047	<u>0.056</u> 0,046	<u>0.072</u> 0,047
	100	<u>0.086</u> 0,049	<u>0.049</u> 0,027	<u>0.038</u> 0,021	<u>0.030</u> 0,012	<u>0.016</u> 0,004	<u>0.008</u> 0,002
	125	<u>0.111</u> 0,064	<u>0.078</u> 0,048	<u>0.063</u> 0,040	<u>0.040</u> 0,026	<u>0.032</u> 0,023	<u>0.024</u> 0,019
	200	<u>0.043</u> 0,041	<u>0.030</u> 0,026	<u>0.022</u> 0,019	<u>0.015</u> 0,013	<u>0.013</u> 0,011	<u>0.010</u> 0,009

Скругление кромок контактирующих пластин приводит в ряде опытов к снижению при удельных давлениях 4–8 МПа коэффициента трения покоя и в меньшей мере коэффициента трения движения. Использование в опытах пластин равной площади контакта дает при удельном давлении на прокладки от 4 МПа до 8 МПа снижение коэффициента трения покоя в среднем на 34 % и коэффициента трения движения на 26 % по сравнению с аналогичными данными, полученными с использованием пластин разной площади.

В продолжении исследования представлены результаты экспериментального исследования влияния темпера-

туры на коэффициент трения покоя и движения фторопластовых прокладок.

Поддержание повышенной температуры фторопластовых прокладок осуществлялось нагревом их зон зажимов с помощью нагревательного устройства машины FPZ-100/I и специального нагревательного устройства в приспособлении подвижного захвата машины. Пониженная температура достигалась путем охлаждения прокладок и зон захватов парами испаряющегося жидкого азота. Температура контролировалась термопарами.

Скорость взаимного смещения прокладок составила 0,05 и 1,0 мм/мин.

В таблицах 8 и 9 предоставлены значения коэффициента трения покоя (f_{II}) и движения (f_{II}), определенные при изменении значений удельного давления (p) на прокладки в пределах от 1,0 до 13,5 МПа и при заданной температуре (T) фторопластовых прокладок в диапазоне от -46 до 260 °С. Коэффициент трения движения определялся при достижении величины взаимного смещения (Δ) прокладок в один миллиметр.

Определены величины отношения коэффициента трения покоя к коэффициенту трения движения

$\lambda = f_{II}/f_{II}$ [6]. Согласно данным величина λ изменялась от 1,1 до 1,9. Среднее значение отношения λ_1 (при соответствующих удельных давлениях p) изменялось от 1,3 до 1,7, причем влияние скорости смещения прокладок на отношение λ_1 выявить не удалось. Среднее значение λ_2 (при соответствующих скоростях смещения V) изменялось в зависимости от удельного давления p от 1,4 (при $p=8,0$ МПа) до 1,6 (при $p=2,5-6,0$ МПа).

Таблица 9

Значения коэффициентов трения покоя и движения ($V = 1$ мм/мин) фторопластовых прокладок в зависимости от удельного давления и температуры

Удельное давление p , МПа	T , °С	f_{II}	f_{II}
1,0	+100	0,105	0,06
2,5	-46	0,148	0,128
4,0	-41	0,121	0,100
	-3	0,146	0,114
5,0	-41	0,108	0,086
	-3	0,110	0,096
	+1	0,087	0,060
6,0	-37	0,098	0,077
	-3	0,110	0,083
	+1	0,076	0,052
7,0	-37	0,094	0,070
	+2	0,070	0,048
8,0	+2	0,074	0,052
10,0	+125	0,019	0,016
13,5	-30	0,073	0,053
	+2	0,057	0,038
	+35	0,049	0,049
	+100	0,018	0,011
	+125	0,016	0,016

Значения коэффициента трения покоя и движения с повышением температуры от 20 до 200 °С снижаются примерно в среднем в 7 и 5 раз соответственно, причем с повышением значений удельного давления тенденция более значительна. При температуре 260 °С значения коэффициента трения движения несколько повышаются, что объясняется более значительными размягчением фторопластовых прокладок и более значительным внедрением контактирующих поверхностей.

Значения коэффициента трения покоя и движения при температурах, близких к 0 °С, несколько снижаются по сравнению со значениями коэффициента при 20 °С. С дальнейшим понижением температуры (до -30...-46 °С) коэффициент трения покоя, а в большей мере коэффициент трения движения возрастает.

С увеличением удельного давления на фторопластовые прокладки значения коэффициента трения покоя и движения во всем диапазоне исследованных температур снижаются.

Отношение $\lambda = f_{II}/f_{II}$ в целом уменьшается с повышением и понижением температуры по сравнению со значениями λ при $T = 20$ °С. При температурах 100 и 125 °С отмечается некоторая нестабильность значений λ . Влияние удельного давления в диапазоне от 2,5 до 13,5 МПа на значения λ несущественно за исключением случаев действия высоких температур (125...260 °С) и давлений, больших 5 МПа, когда значения коэффициента трения покоя и движения близки по величине (практически сравниваются).

Следует обратить внимание на очень малые значения коэффициента трения покоя и движения фторопласта по фторопласту при повышенных температурах (больше 100 °С) и высоких удельных давлениях на контактирующие поверхности пластин.

Влияние скорости смещения фторопластовых прокладок на значение коэффициента трения при повышенных температурах (например, при 200 °С) несущественно.

**Значения коэффициента трения движения ($V = 0,05$ мм/мин) фторопластовых прокладок
в зависимости от величины взаимного смещения их при температурах 20 и 65 °С**

Удельное давление p , МПа	Т, °С	Величина смещения Δ (мм)		
		1	5	25
2,5	20	0,074	0,055	0,031
	65	0,068	0,059	0,049
4,0	20	0,058	0,051	0,039
	65	0,051	0,040	0,034
5,0	20	0,048	0,042	0,031
	65	0,040	0,033	0,031
7,0	20	0,038	0,034	0,030
	65	0,031	0,030	0,028
8,0	20	0,039	0,037	0,029
	65	0,028	0,028	0,028

В таблице 10 приведены значения коэффициента трения движения фторопластовых прокладок в зависимости от величины взаимного смещения и удельного давления в условиях нормальной и повышенной температуры. Имеет место уменьшение значений коэффициента трения движения по мере увеличения взаимного смещения фторопластовых прокладок как при нормальной температуре, так и при повышенной (65 °С). Можно предположить, что этот вывод распространяется на случаи воздействия более высоких температур.

Изменение коэффициента трения фторопласта о фторопласт при разных условиях загрязнения в зоне контакта определялось по сравнительно ограниченному количеству опытов (в частности, при удельном давлении 7 МПа, скорости смещения 1,0 мм/мин, величине смещения 1 мм). В первых опытах на контактирующие поверхности пластин кисточкой наносился сметанообразный водный раствор смеси 20 % песка, просеянного через сито с ячейкой 0,25 мм ($M_{кр} = 1$), и 80 % глины. Во втором случае контактирующие поверхности запылялись фракциями песка. В третьей серии опытов проводилось запыление только свободной части пластин. Определялись значения коэффициента трения покоя и движения при однократном смещении и после 150 смещений.

Приведем лишь некоторые результаты наблюдений. Прямое загрязнение контактирующих поверхностей пар скольжения из фторопласта приводит к существенному увеличению значений коэффициента трения при однократном смещении по сравнению со значениями, полученными при испытаниях пар с чистыми поверхностями. Фактов выхода из строя (задир, прихваты) и существенного износа пар трения не наблюдалось.

В процессе работы узла (после 150 смещений) значение коэффициента трения движения значительно

снижалось. Часть абразивных частиц вытеснялась из зоны контакта, а остальная часть внедрялась (заглублялась) в тело фторопластовых пластин. Трение между фторопластовыми пластинами в условиях запыления их свободных поверхностей увеличивалось по сравнению с условиями, исключающими загрязнение незначительно. Частицы вытеснялись на края пластин и в зону контакта в основном не попадали.

Испытания пар скольжения при многоцикловом смещении контактирующих пластин проводились на пульсаторах. На первой установке задавались амплитуда перемещений 65 мм, удельное давление 7,0 МПа, скорость смещения 325 мм/мин, а на второй – скорость 1750 мм/мин с амплитудой 35 мм и 70 мм.

На фторопластовые пластины при сборке на зону контакта наносился тонкий слой графитовой смазки (СУ). В другом случае свободная поверхность пластин покрывалась слоем жидкой песчано-глинистой смеси. После каждых 500 циклов на свободную поверхность контактирующих пластин наносился новый слой смеси.

Перед испытаниями и после наработки заданного количества циклов смещения производилось взвешивание пластин и измерение толщины в 5 и в 6 точках других пар пластин в середине зоны контакта. Проводился визуальный осмотр рабочих поверхностей пластин.

Установлено, что в процессе циклирования отсутствует какое-либо разрушение поверхностей пластин в виде задиров, вспучиваний, трещин и др. При наработке 15 000 циклов толщина пластин уменьшалась на 0,2 мм, а вес пластин не изменялся, т.е. износ практически отсутствует.

Коэффициенты трения фторопласта о фторопласт при исследовании влияния на них различных факторов (температуры, давления, загрязненности, числа

циклов наработки и т.д.) определялись по следующим формулам:

$$f_{\text{п}} = k f_{\text{д}},$$
$$f_{\text{д}} = f_0 \cdot \gamma \cdot k_{\text{т}} \cdot k_{\text{р}} \cdot k_{\text{у}} \cdot k_{\text{н}},$$

где f_0 – нормированный коэффициент трения движения, определенный при температуре 20 °С, удельном давлении 4 МПа, скорости смещения 0,05 мм/мин и равный 0,06; γ – коэффициент, учитывающий дисперсию экспериментальных данных и равный 1,1; $k_{\text{т}}$ – коэффициент влияния температуры, изменяющийся от 1,1 до 0,5; $k_{\text{р}}$ – коэффициент влияния удельного давления, определенный в исследованном диапазоне и изменяющийся от 1,2 до 0,6; $k_{\text{у}}$ – коэффициент условий работы относительно запыленности ($k_{\text{у}} = 1,2 \dots 1,3$ в открытых зонах контакта для запыления, $k_{\text{у}} = 1,1 \dots 1,2$ в условиях механической защиты от запыления, $k_{\text{у}} = 1$ в условиях полной изоляции от пыли, $k_{\text{у}} = 0,8 \dots 0,9$ при смазке контакта в открытых зонах запыления, $k_{\text{у}} = 0,7 \dots 0,8$ при смазке контакта в условиях механической защиты от запыления, $k_{\text{у}} = 0,6$ в условиях полной защиты от пыли).

Введен коэффициент $k_{\text{н}}$ влияния наработки циклического смещения с амплитудой ± 60 мм ($k_{\text{н}} = 0,9 \dots 1,0$ в условиях смазки поверхностей, $k_{\text{н}} = 1,1 \dots 1,4$ – в условиях сухого трения).

Учитываются соотношения коэффициентов трения и движения ($k = 1,1 \dots 1,2$ – в условиях смазки поверхностей, $k = 1,3 \dots 1,5$ в условиях сухого трения, $k = 1,6 \dots 1,7$ в условиях запыления).

Безопасная работа фторопластовых прокладок под опору трубопроводов (А 3375 – ТТИ – 2,1) возможна при коэффициенте трения не более 0,1.

Выводы

1. Коэффициент трения покоя и движения по мере увеличения удельного давления на фторопластовые прокладки антифрикционного устройства от 2,5 МПа до 7,0 МПа при скорости смещения пластин от 0,04 до 0,75 мм/мин уменьшается относительно опытов с меньшим давлением в среднем на 48 и 37 % независимо от скорости смещения.

2. Коэффициент трения движения меньше коэффициента трения покоя в исследованном диапазоне факторов в среднем на 33 % независимо от величины удельного давления и скорости смещения прокладок при максимальных отклонениях в 10 и 48 %.

3. Влияние удельного давления и скорости смещения прокладок на величину сдвига перед моментом движения пластин относительно друг друга несущественно.

4. Коэффициент трения движения при смещении фторопластовых прокладок со скоростями 0,04, 0,05, 1,0 мм/мин и величинах удельного давления от 2,5 до 8 МПа на 5 и на 300 мм снижается на 11 % и в 1,6 раза соответственно по сравнению с коэффициентом трения движения, определенным при смещении на 1 мм.

5. Значение коэффициента трения покоя и движения фторопластовых пар с повышением температуры

от 20 до 100 °С снижается в среднем в 7 и в 5 раз соответственно, причем с повышением удельного давления снижение более значительно.

6. Значения коэффициента трения покоя и движения при температурах, близких к нулю, снижаются в среднем на 28 и на 8 % по сравнению с результатами, полученными в опытах при 20 °С. С понижением температуры опытов (до -30...-46°С) разброс результатов разнонаправлено увеличивается. Коэффициент трения покоя снижается в среднем на 12 %, а коэффициент трения движения повышается в среднем на 16 % относительно данных опытов при температуре 20 °С.

7. С повышением удельного давления на фторопластовые прокладки значения коэффициента трения покоя и движения во всем диапазоне исследованных температур снижаются.

8. Загрязнение контактирующих поверхностей пар скольжения из фторопласта приводит к естественному увеличению значений коэффициента трения. С увеличением количества смещений пластин коэффициент трения движения снижается. Разрушений рабочих поверхностей пластин не наблюдалось. При многоцикловом смещении прокладок (15 000 циклов) износ пластин практически отсутствовал.

9. Даны рекомендации по определению величины коэффициента трения покоя и движения с учетом исследованных факторов.

Литература

1. Седакова, Е. Б. Механизмы износа политетрафторэтилена при трении по стали различных марок / Е. Б. Седакова, Ю. П. Козырев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 2. – С. 80–84.

2. Разработка базальтопластиков триботехнического назначения на основе ПТФЭ методом механоактивации / А. А. Охлопкова [и др.] // Вестник машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 56–59.

3. Петрова, П. Н. Разработка полимерных композиций на основе политетрафторэтилена, модифицированного моторными маслами / П. Н. Петрова, А. П. Федоров, А. А. Охлопкова // Вестник машиностроения. – 2016. – № 2. – С. 75–79.

4. Седакова, Е. Б. Теоретический и экспериментальный анализы эффекта повышения износостойкости политетрафторэтилена при его наполнении дисперсными частицами / Е. Б. Седакова, Ю. П. Козырев // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 52–55.

5. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств хаотически армированных полимерных композиций с антифрикционными дисперсными добавками / А. П. Сычев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 44–47.

6. Александров, И. К. Определение отношения коэффициентов трения покоя и трения скольжения фрикционной пары / И. К. Александров // Вестник машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 3–5.

L.I. Ogorodov, V.A. Shapkina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Vologda State University

**RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDY OF COEFFICIENT
OF FLUOROPOLYMER ON FLUOROPOLYMER REST AND MOVEMENT FRICTION DEPENDING
ON A NUMBER OF FACTORS**

The results of the study of the coefficient of friction of rest and movement of fluoropolymer on fluoropolymer (F-4) depending on the magnitude of the specific pressure, the displacement velocity, the mutual displacement of the plates relative to each other and the temperature of the experiments, as well as contamination of the contact zone and multi-cycle displacements are presented.

Coefficient of friction, fluoropolymer, specific pressure, displacement velocity and magnitude, temperature.