

УДК 678.073:661.481

## РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДА

С. В. Панин<sup>\*,\*\*</sup>, Ц. Ло<sup>\*\*</sup>, Д. Г. Буслович<sup>\*</sup>,  
Л. А. Корниенко<sup>\*</sup>, В. О. Алексенко<sup>\*</sup>, С. А. Бочкарева<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>\*\*</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия

E-mails: svp@ispms.ru, jiangkun169@gmail.com, buslovichdg@gmail.com,  
rosmc@ispms.tsc.ru, vl.aleksenko@mail.ru, svetlanab7@yandex.ru

Исследованы механические и трибологические характеристики трехкомпонентных антифрикционных композитов на основе полиимида, наполненных политетрафторэтиленом и рублеными углеродными волокнами с массовой долей 5–15 %. Показано, что за счет введения рубленых углеродных волокон можно увеличить модуль упругости практически в два раза. Исследование трибологических характеристик показало, что при использовании указанного комплексного наполнителя степень износа поверхностей по сравнению со случаем полиимида без наполнителя уменьшается в 265 раз при металло-полимерном трибосопряжении и в 255 раз при керамико-полимерном. С помощью разработанного компьютерного алгоритма определены оптимальные составы трехкомпонентного твердосмазочного композита на основе полиимида для их использования при металло- и керамико-полимерном трибосопряжении.

Ключевые слова: полиимид, углеродные волокна, политетрафторэтилен, прочность, износостойкость, оптимальное проектирование.

DOI: 10.15372/PMTF20210618

**Введение.** Полиимиды (ПИ) являются высокотехнологичными инженерными пластиками, обладающими хорошими механическими свойствами. Это позволяет использовать их как без наполнителя, так и с наполнителем для изготовления композиционных материалов [1–8]. Композиты на основе ПИ находят широкое применение в электронике, автомобилестроении, космической промышленности, самолетостроении, медицине и т. д. [9, 10]. В то же время ПИ редко применяются при изготовлении деталей трибоузлов, поскольку в отсутствие наполнителя происходит значительный износ при сухом трении скольжения [11, 12].

---

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения СО РАН (код проекта FWRW-2021-0010) и при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант № НШ-2718.2020.8), а также Российского фонда фундаментальных исследований и Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-58-00032\_Бел\_а (Т20Р-223)).

© Панин С. В., Ло Ц., Буслович Д. Г., Корниенко Л. А., Алексенко В. О., Бочкарева С. А., 2021

Для повышения износостойкости ПИ за счет использования твердосмазочных наполнителей наиболее широко применяется политетрафторэтилен (ПТФЭ), что позволяет существенно уменьшать износ и коэффициент трения в узлах сопряжения деталей [13–15]. Существует ряд работ, посвященных созданию антифрикционных композитов на основе термопластичного полиимида, в которых низкий коэффициент трения и повышенная износостойкость достигаются путем введения в полиимид ПТФЭ, наночастиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{WS}_2$  и других частиц [16, 17]. При этом ухудшение механических характеристик при наполнении матрицы частицами твердосмазочных материалов компенсируется введением армирующих волокон [18].

Таким образом, эффективным способом создания антифрикционных материалов на основе ПИ является одновременное введение армирующих волокон и твердосмазочных наполнителей.

В [19] исследованы механические и трибологические характеристики двух- и трехкомпонентных композитов на основе ПИ, наполненных ПТФЭ и короткими (молотыми) углеродными волокнами при различных нагрузках и скоростях. Показано, что введение ПТФЭ повышает износостойкость композита, но при этом существенно уменьшается модуль упругости. Поэтому для повышения прочностных характеристик (модуля упругости и предела прочности) ПИ-композитов целесообразно вводить длинные (рубленые) углеродные волокна длиной несколько миллиметров.

Задача определения оптимального содержания армирующего и твердосмазочного наполнителей может быть решена с использованием полученных экспериментальных данных о механических и трибологических характеристиках композитов на основе ПИ с помощью разработанного компьютерного алгоритма вычисления оптимальных значений управляющих параметров. Это позволит сформулировать рекомендации по получению ПИ-композитов с заданными механическими (трибологическими) характеристиками для эксплуатации в узлах трибосопряжения при различных условиях нагружения [20].

Целью данной работы является определение оптимального состава высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПИ, наполненного ПТФЭ и армированного рублеными углеродными волокнами (РУВ), для применения в узлах трения при металло- и керамико-полимерном трибосопряжении.

**1. Материалы и методы исследований.** Использовался порошок термопластичного полиимида (Solver, КНР) со средним размером частиц 16 мкм. В качестве наполнителей выбирались мелкодисперсный порошок “Флуралит”, получаемый путем термического разложения фторопласта Ф-4 (диаметр частиц 3 мкм), и РУВ (Tenax®-A) длиной  $l \approx 2$  мм. Порошки ПИ и наполнителей смешивались в планетарной шаровой мельнице МР/0,5\*4 после диспергирования компонентов в ультразвуковой ванне ПСБ-Галс 1335-05. Объемные заготовки полимерных композитов изготавливались горячим прессованием порошковых смесей при давлении 15 МПа и температуре 370 °С с использованием лабораторной установки, находившейся на базе гидравлического пресса МС-500. Охлаждение заготовок осуществлялось без снятия нагрузки при скорости охлаждения  $\Delta T = 5$  °С/мин.

Механические характеристики исследовались в соответствии со стандартом D638 Американского общества по испытанию материалов (ASTM) в ходе разрывных испытаний на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов, количество которых для каждого состава составляло не менее четырех. Образцы имели форму двойной лопатки со следующими размерами: толщина —  $(3,2 \pm 0,4)$  мм, ширина рабочей части —  $(3,18 \pm 0,5)$  мм, длина рабочей части —  $(9,53 \pm 0,50)$  мм, полная ширина —  $(9,53 \pm 3,18)$  мм, полная длина —  $(63,5 \pm 0,4)$  мм, длина базы экстензометра —  $(7,62 \pm 0,25)$  мм, расстояние между захватами —  $(25,4 \pm 5,0)$  мм, радиус закругления —  $(12,7 \pm 1,0)$  мм. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 1 мм/мин.

Таблица 1

Физико-механические характеристики композитов на основе ПИ

Композит	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$	$E$ , ГПа	$\sigma$ , МПа	$\varepsilon$ , %
Исходный ПИ	1,37	80,2 ± 0,8	2,60 ± 0,69	110,7 ± 1,0	13,0 ± 0,7
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (5 %)	1,40	76,8 ± 0,7	4,03 ± 0,20	106,2 ± 2,8	5,1 ± 0,9
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (5 %)	1,42	79,0 ± 0,2	5,13 ± 0,06	126,7 ± 4,5	4,1 ± 0,2
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (5 %)	1,43	80,8 ± 0,2	6,71 ± 0,17	153,0 ± 2,8	4,1 ± 0,1
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (10 %)	1,43	75,8 ± 0,3	3,96 ± 0,22	103,0 ± 7,1	4,4 ± 0,5
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (10 %)	1,44	77,5 ± 0,6	5,79 ± 0,45	115,9 ± 3,5	4,1 ± 0,3
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (10 %)	1,45	79,1 ± 0,3	6,40 ± 0,35	142,1 ± 4,9	3,7 ± 0,3
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (15 %)	1,44	75,1 ± 0,3	3,79 ± 0,06	84,3 ± 7,7	3,9 ± 0,7
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (15 %)	1,45	76,4 ± 0,3	4,97 ± 0,21	93,5 ± 10,7	2,9 ± 0,3
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (15 %)	1,46	79,1 ± 0,5	7,59 ± 0,21	121,19 ± 9,5	3,1 ± 0,2

Модуль упругости при растяжении  $E$  вычислялся по формуле

$$E = \frac{(F_2 - F_1)L_0}{S_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (1)$$

где  $F_1, F_2$  — значения нагрузок, соответствующие относительному удлинению 0,1 и 0,3 %;  $\Delta l_1, \Delta l_2$  — удлинение при нагрузках  $F_1, F_2$  соответственно, мм;  $L_0$  — полная длина образца, мм;  $S_0$  — площадь начального поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Испытание образцов на износ в режиме сухого трения проводилось по схеме “шар по диску” при нагрузке  $P = 5$  Н и скорости скольжения  $V = 0,3$  м/с на трибометре CSEM СН-2000 (ASTM G99). В трибологических испытаниях использовались контртела в форме шарика из стали марки ШХ15 и керамики ZrO<sub>2</sub>. Диаметр контртела составлял 6 мм. Расстояние, на которое перемещалось контртело, равно 1 км, радиус триботрека — 16 мм.

Степень износа определялась с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ. Исследования структуры выполнялись на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхности скола образцов с надрезом, разрушенных после выдержки в жидком азоте.

**2. Результаты исследований.** Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований трехкомпонентных композитов на основе ПИ.

2.1. *Физико-механические свойства.* Данные о физико-механических характеристиках исследованных ПИ-композитов приведены в табл. 1 ( $\rho$  — плотность,  $D$  — твердость по Шору,  $E$  — модуль упругости при растяжении,  $\sigma$  — прочность при растяжении,  $\varepsilon$  — относительное удлинение при разрыве). Прочностные характеристики этих композитов (модуль упругости, предел текучести) увеличиваются по сравнению с исходным ПИ в зависимости от массовой доли углеволокна в них: максимальное увеличение (более чем в два раза) модуля упругости наблюдается в композитах с массовой долей углеродных волокон (УВ) 15 %. Из результатов анализа диаграмм напряжение — деформация следует, что наличие наполнителей оказывает влияние на механические характеристики трехкомпонентных ПИ-композитов (рис. 1).

2.2. *Трибологические испытания по схеме “шар по диску”.* Трибологические характеристики всех указанных выше композитов приведены в табл. 2, из которой следует, что по сравнению с ПИ без наполнителя степень износа исследуемых композитов уменьшается в 268 раз в случае металлополимерного трибосопряжения и в 256 раз в случае керамикополимерного. Оптимальное значение массовой доли ПТФЭ находится в диапазоне 10–15 %.

Для определения оптимального содержания наполнителей обоих типов необходимо обеспечить наилучшие механические и триботехнические характеристики. С этой целью

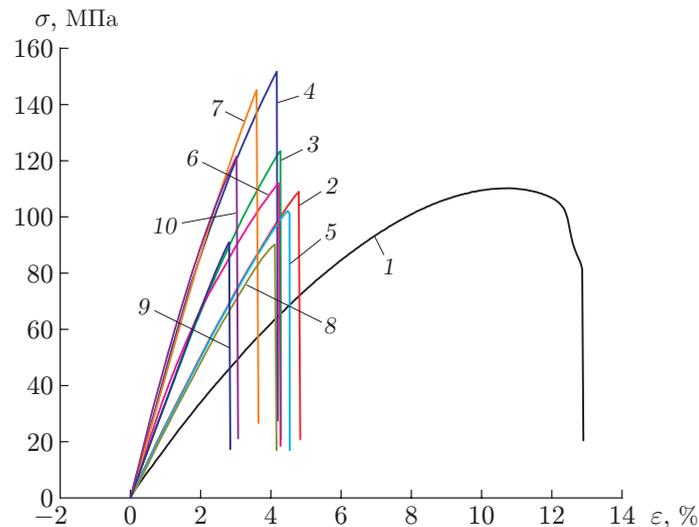


Рис. 1. Диаграммы напряжение — деформация для ПИ (1), ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (5 %) (2), ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (5 %) (3), ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (5 %) (4), ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (10 %) (5), ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (10 %) (6), ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (10 %) (7), ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (15 %) (8), ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (15 %) (9), ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (15 %) (10)

приведенные выше результаты механических и трибологических испытаний для трибосопряжений различного типа представлялись и анализировались в виде поверхностей и соответствующих им изолиний. Методика такого представления данных описана в работах [21, 22]. При интерполяции экспериментально полученных дискретных значений использовался полином Лагранжа с целью получения непрерывного распределения искомых значений.

*2.3. Определение состава ПИ-композигов для металло- и керамико-полимерных трибосопряжений.* Для определения оптимального содержания наполнителей необходимо задать пороговые значения эффективных характеристик. Они выбираются как на основе анализа имеющихся данных, так и путем сравнения со свойствами полимера без наполнителя. Для случая металлополимерного трибосопряжения были сформулированы менее строгие требования к деформационно-прочностным свойствам, поскольку сталь обладает меньшей твердостью по сравнению с керамикой и должна вызывать менее существенное повреждение. В то же время для случая керамико-полимерного сопряжения было выбрано большее значение коэффициента трения. Требование к сопротивлению износа было идентичным. Для случаев металло- и керамико-полимерного сопряжения были приняты следующие ограничения: модуль упругости при растяжении — более 5 ГПа и более 6 ГПа соответственно, предел прочности при растяжении — более 110 МПа и более 130 МПа, удлинение — более 4 % и более 3,8 %, коэффициент трения — менее 0,05 и менее 0,15, степень износа — менее  $0,5 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м) в обоих случаях, площадь износа контртела — менее 0,06 мм<sup>2</sup> и не определена.

Поскольку экспериментальные значения степени износа варьируются в большом диапазоне: для металлического контртела —  $(0,27 \div 190,00) \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), для керамического —  $(0,14 \div 321,00) \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), интерполяция с использованием полинома Лагранжа [21] для получения непрерывного распределения искомых значений дает некорректные результаты. Поэтому при интерполировании используются логарифмические зна-

Таблица 2

Трибологические характеристики композитов на основе ПИ ( $P = 5 \text{ Н}$ ,  $V = 0,3 \text{ м/с}$ ), полученные в эксперименте по схеме “шар по диску”

Композит	$f$		$\Delta \cdot 10^6, \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	
	Металлическое контртело	Керамическое контртело	Металлическое контртело	Керамическое контртело
Исходный ПИ	$0,388 \pm 0,012$	$0,375 \pm 0,008$	$134,16 \pm 18,50$	$77,34 \pm 2,25$
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (5 %)	$0,283 \pm 0,050$	$0,263 \pm 0,018$	$190,53 \pm 13,05$	$184,15 \pm 14,06$
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (5 %)	$0,254 \pm 0,031$	$0,229 \pm 0,008$	$124,64 \pm 11,32$	$321,13 \pm 22,53$
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (5 %)	$0,253 \pm 0,034$	$0,226 \pm 0,021$	$13,83 \pm 1,60$	$263,43 \pm 21,70$
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (10 %)	$0,061 \pm 0,010$	$0,063 \pm 0,037$	$2,40 \pm 0,38$	$0,14 \pm 0,03$
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (10 %)	$0,083 \pm 0,003$	$0,094 \pm 0,007$	$0,46 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,02$
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (10 %)	$0,174 \pm 0,051$	$0,135 \pm 0,018$	$7,44 \pm 0,90$	$0,26 \pm 0,05$
ПИ — УВ (5 %) — ПТФЭ (15 %)	$0,047 \pm 0,004$	$0,053 \pm 0,005$	$0,33 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,03$
ПИ — УВ (10 %) — ПТФЭ (15 %)	$0,041 \pm 0,006$	$0,105 \pm 0,006$	$0,27 \pm 0,04$	$0,33 \pm 0,05$
ПИ — УВ (15 %) — ПТФЭ (15 %)	$0,122 \pm 0,039$	$0,115 \pm 0,016$	$7,78 \pm 0,69$	$0,43 \pm 0,07$

Примечание.  $f$  — коэффициент трения,  $\Delta$  — степень износа.

Таблица 3

Физико-механические характеристики композитов на основе ПИ, соответствующие оптимальному составу

Композит	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D$	$E, \text{ ГПа}$	$\sigma, \text{ МПа}$	$\varepsilon, \%$
Исходный ПИ	1,37	$80,2 \pm 0,8$	$2,60 \pm 0,69$	$110,7 \pm 1,0$	$13,0 \pm 0,7$
ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %)	1,43	$77,8 \pm 0,5$	$5,56 \pm 0,24$	$117,8 \pm 6,9$	$4,1 \pm 0,3$
ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %)	1,43	$79,1 \pm 0,8$	$6,65 \pm 0,13$	$135,0 \pm 4,9$	$3,8 \pm 0,2$

чения экспериментально полученных величин. В этом случае различие максимального и минимального значений уменьшается, но сохраняется общий характер изменения, что дает более корректный результат.

Зависимости логарифмических значений эффективных характеристик ПИ-композитов от нормированных массовых долей рубленых УВ ( $\varphi_{\text{РУВ}}$ ) и ПТФЭ ( $\varphi_{\text{ПТФЭ}}$ ) представлены в виде изолиний, совмещение которых определяет область, соответствующую оптимальным параметрам (рис. 2). В случае керамического контртела площадь износа мала и не определяется, поэтому при совмещении изолиний данный параметр не использовался (см. рис. 2, б). Заштрихованные области на рис. 2 удовлетворяют всем наложенным ограничениям. С учетом возможного разброса характеристик компонентов ПИ-композита, а также допустимого отклонения от технологических параметров в качестве оптимальных выбраны составы, соответствующие центрам выделенных областей, а именно: на рис. 2, а — ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %), на рис. 2, б — ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %).

Были изготовлены образцы, для которых определялись механические (табл. 3) и трибологические (табл. 4, 5) свойства ( $V$  — скорость движения контртела,  $P$  — нагрузка на контртело).

Согласно данным табл. 3 исследуемые композиты соответствуют всем требованиям, предъявляемым к механическим свойствам. При этом большая массовая доля УВ в композите ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) обуславливает его более высокие прочностные свойства.

Более информативны данные о трибологических характеристиках. Поскольку значения нагрузки и скорости менялись в широком диапазоне, представляло интерес выяс-

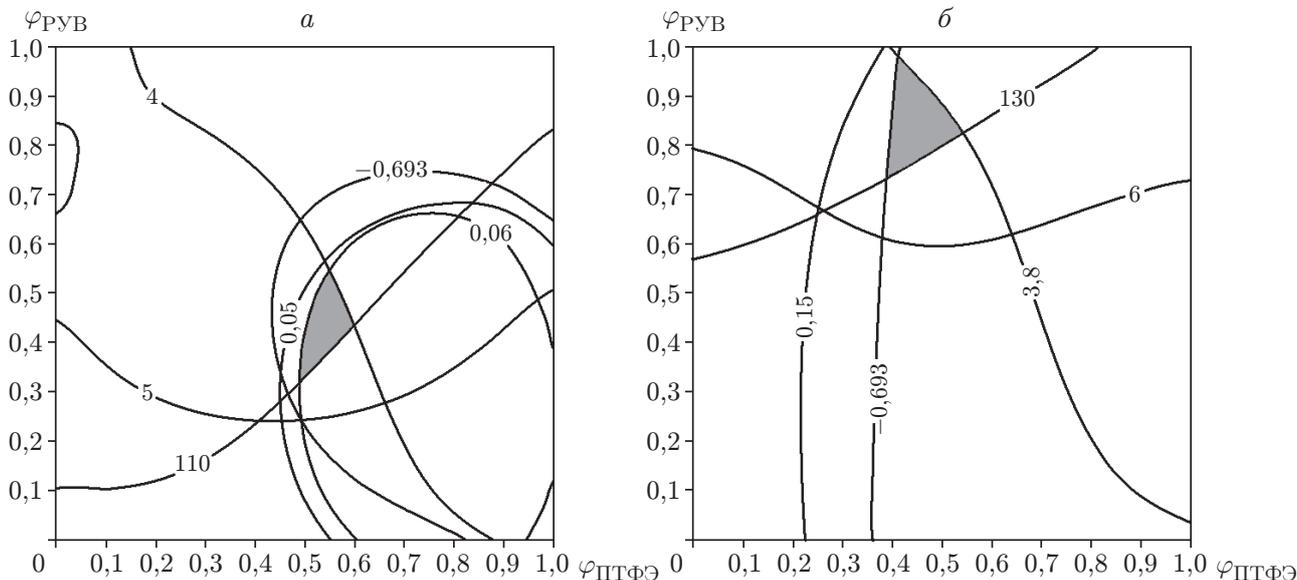


Рис. 2. Изолинии нормированных эффективных характеристик ПИ-композигов и области их оптимальных значений (заштрихованные области):

*a* — металлополимерное сопряжение, *б* — керамико-полимерное сопряжение

Таблица 4

Значения коэффициента трения при различных условиях нагружения композитов  
 ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (композит 1) и ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) (композит 2)

<i>P</i> , Н	$\mu$					
	<i>V</i> = 0,1 м/с		<i>V</i> = 0,3 м/с		<i>V</i> = 0,6 м/с	
	Композит 1	Композит 2	Композит 1	Композит 2	Композит 1	Композит 2
5	0,048 ± 0,004	0,103 ± 0,012	0,051 ± 0,003	0,098 ± 0,004	0,053 ± 0,004	0,095 ± 0,006
10	0,047 ± 0,003	0,061 ± 0,002	0,048 ± 0,002	0,078 ± 0,008	0,049 ± 0,005	0,077 ± 0,007
15	0,044 ± 0,002	0,050 ± 0,003	0,050 ± 0,003	0,058 ± 0,004	0,051 ± 0,002	0,056 ± 0,004

нить, насколько стабильны значения коэффициента трения  $\mu$  и степени износа. Из табл. 4 следует, что для металлополимерного сопряжения величина  $\mu$  изменяется в небольшом диапазоне:  $\mu = 0,044 \div 0,053$ , что приблизительно на порядок меньше, чем в ПИ без наполнителя ( $\mu = 0,388$ ). Таким образом, при данных условиях композит во всем исследованном диапазоне нагрузок *P* и скоростей *V* сохраняет антифрикционные свойства. В случае скольжения по керамическому контртелу значения  $\mu$  в два раза больше, их разброс также увеличивается:  $\mu = 0,103 \div 0,050$ . Несмотря на существенное различие значений коэффициента трения для металлического и керамического контртел, степень износа различается в меньшей степени. Для всех условий трибонагружения минимальное и максимальное значения степени износа зафиксированы при  $P = 10$  Н,  $V = 0,1$  м/с и равны соответственно  $0,15 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н · м) для стального и  $0,30 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н · м) для керамического контртела.

Однако согласно приведенным на рис. 3, *a, б* фотографиям поверхностей композитов с дорожками, образовавшимися вследствие трения, степень износа была очень мала: видны следы шлифовки, появившиеся в процессе подготовки образцов. Таким образом, указанное различие значений степени износа является скорее качественным, чем количественным. Различие значений коэффициента трения при испытаниях с контртелами различного типа, по-видимому, обусловлено тем, что на поверхности стального шарика формируется полимерная пленка переноса (рис. 3, *в*), облегчающая скольжение, в то время как на по-

Таблица 5

Значения степени износа  $\Delta$  при различных условиях нагружения композитов  
 ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (композит 1) и ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) (композит 2)

$P, \text{ Н}$	$\Delta \cdot 10^6, \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$					
	$V = 0,1 \text{ м/с}$		$V = 0,3 \text{ м/с}$		$V = 0,6 \text{ м/с}$	
	Композит 1	Композит 2	Композит 1	Композит 2	Композит 1	Композит 2
5	$0,20 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,03$
10	$0,15 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,02$
15	$0,25 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,03$

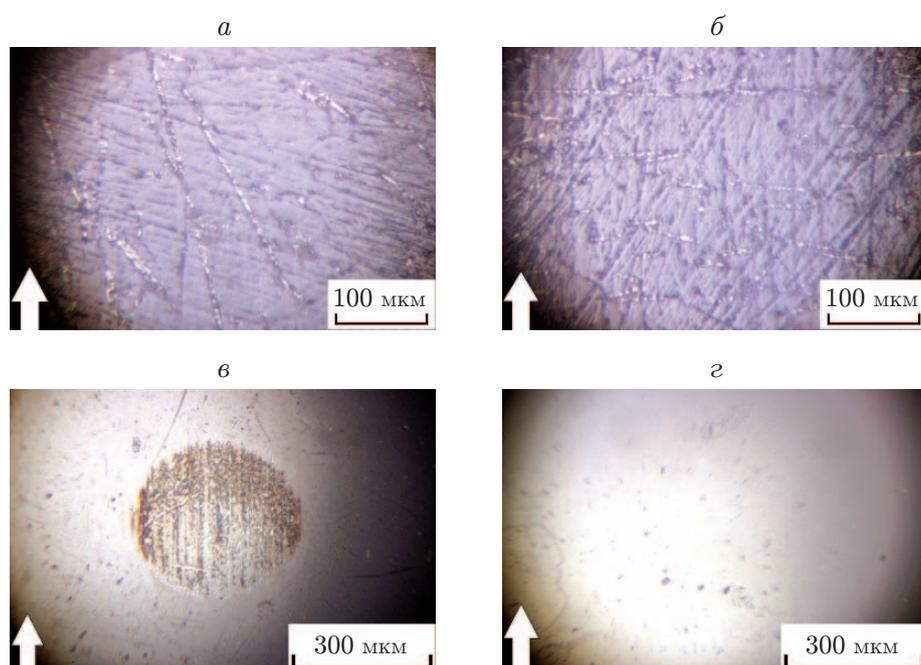


Рис. 3. Дорожки трения на поверхностях композитов ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (*а*) и ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) (*б*) при скольжении по ним металлического (*в*) и керамического (*г*) контртела ( $V = 0,1 \text{ м/с}$ ,  $P = 10 \text{ Н}$ , стрелки — направление движения контртела)

поверхности керамического шарика (рис. 3, *г*) его реакционная способность меньше, что препятствует закреплению (и длительному сохранению) пленки [19].

**3. Обсуждение результатов.** На рис. 4 приведены зависимости степени износа от скорости и нагрузки при трибоиспытаниях для двух типов контртел. Видно, что данный параметр является нелинейной функцией обеих переменных и имеет минимальное значение  $\Delta = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ .

Из рис. 4 следует, что минимальное значение степени износа имеет место при минимальной скорости скольжения. По-видимому, именно в этих условиях пленка переноса может сформироваться и в течение длительного времени сохраняться на поверхности контртела либо сформироваться на поверхности скольжения полимерного композита (рис. 5, *б*), что обеспечивает облегченное скольжение контртела. При схеме испытаний “шар по диску” контртело скользит по поверхности композита, в котором частицы твердосмазочного материала распределены достаточно равномерно (рис. 5, *а*).

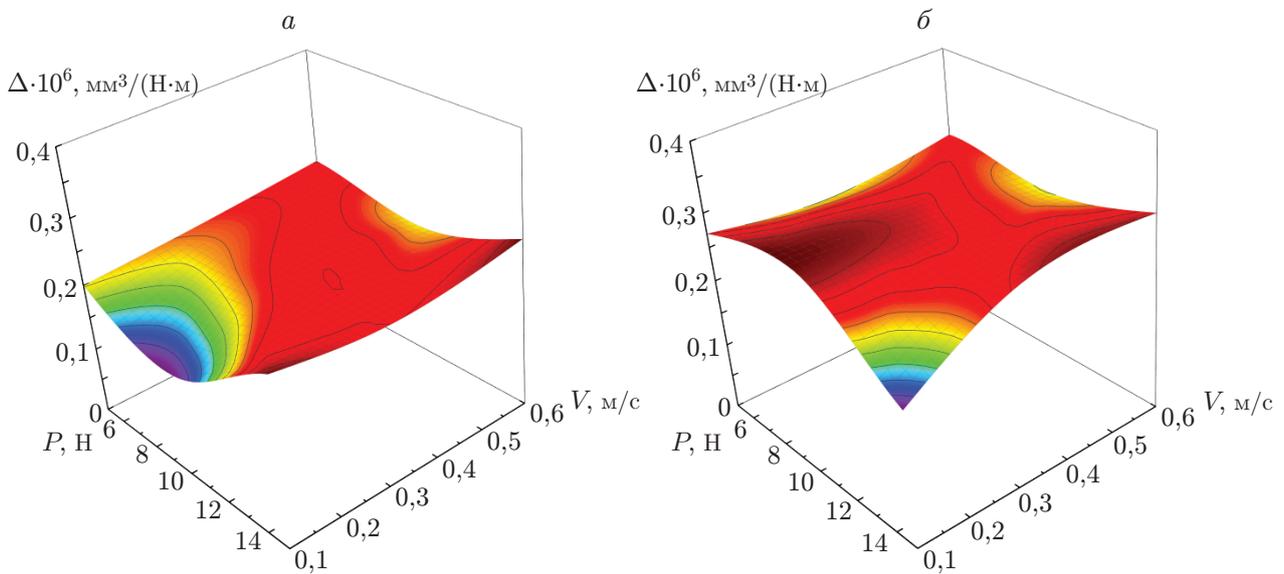


Рис. 4. Зависимости степени износа в композитах ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (а) и ПИ — УВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) (б) от нагрузки и скорости:

а — металлическое контролело, б — керамическое контролело

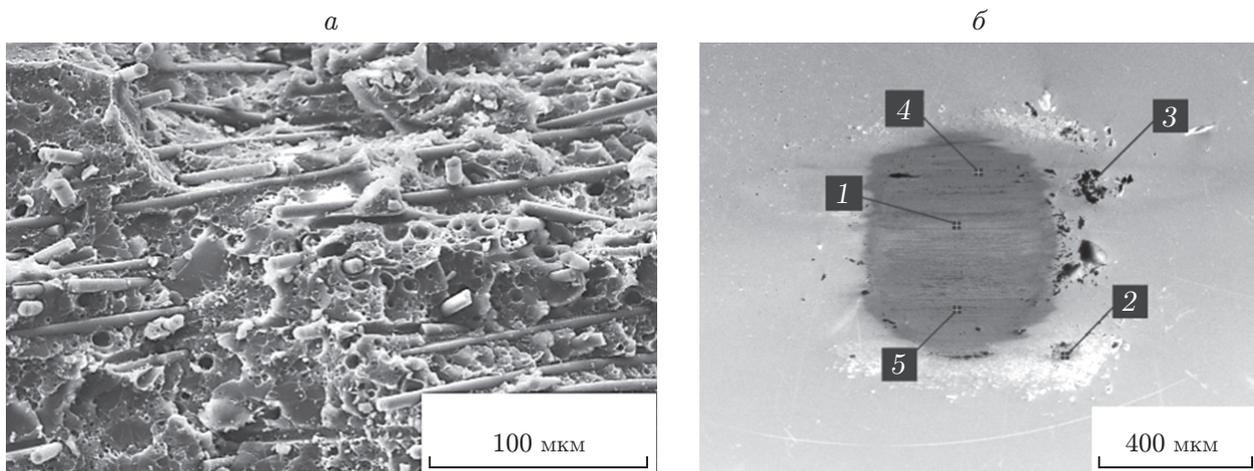


Рис. 5. Микрофотографии композита ПИ — УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (а) и металлического контролела, скользящего по его поверхности (б), полученные с помощью растрового электронного микроскопа:

1–5 — точки, в которых измерялись массовые и объемные доли компонентов материала контролела

Таблица 6

Результаты микроанализа пленки переноса и продуктов износа  
на поверхности стального контртела, скользящего по поверхности композита  
ПИ – УВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) (см. рис. 5)

Номер точки на рис. 5	Cr		Fe		F		C		O	
	$\varphi$ , %	$\nu$ , %								
1	1,18	1,27	98,82	98,73	—	—	—	—	—	—
2	0,92	0,52	73,23	38,64	0,78	1,21	21,99	53,96	3,08	5,67
3	0,68	0,31	57,43	23,95	4,81	5,90	32,84	63,68	4,24	6,17
4	3,10	2,76	91,19	76,42	1,02	2,51	4,70	18,30	—	—
5	1,45	1,35	93,42	81,00	2,05	5,22	3,08	12,43	—	—

Примечание.  $\varphi$  — массовая доля компонента,  $\nu$  — объемная доля компонента.

В результате на поверхности скольжения армированного УВ полимера из продуктов износа должна формироваться пленка ПТФЭ, в то время как на контртеле формируется пленка переноса, также обогащенная фторопластом, входящим в состав ПТФЭ (табл. 6).

Таким образом, необходимые трибологические свойства разработанных трехкомпонентных композитов ПИ–РУВ–ПТФЭ в широком диапазоне параметров испытаний как для керамического, так и для стального контртела обусловлены формированием и сохранением пленки твердосмазочного композита на поверхности контртела и поверхности скольжения армированных УВ полимеров.

**Заключение.** Исследованы механические и трибологические характеристики композитов на основе полиимида, наполненных политетрафторэтиленом и рублеными углеродными волокнами с массовой долей 5–15 %. Показано, что введение рубленых углеродных волокон приводит к увеличению модуля упругости более чем в два раза. Установлено, что наибольшей износостойкостью обладает композит на основе трехкомпонентной смеси с РУВ и ПТФЭ. В случае металлополимерного трибосопряжения степень его износа уменьшается в 265 раз по сравнению с ПИ без наполнителя, в случае керамики-полимерного — в 255 раз.

С использованием разработанного компьютерного алгоритма определены оптимальные составы трехкомпонентного высокопрочного износостойкого композита на основе полиимида при металло- и керамики-полимерном трибосопряжении в узлах трения при значениях скорости скольжения  $V = 0,1 \div 0,6$  м/с и нагрузки  $P = 5 \div 15$  МПа: ПИ — РУВ (9,5 %) — ПТФЭ (11,5 %) и ПИ — РУВ (13,5 %) — ПТФЭ (9,5 %) соответственно. Оптимальный состав указанного композита обусловлен формированием и сохранением на поверхности контртела пленки переноса, содержащей фторопласт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Sinz J., Knoll M., Groche P.** Operational effects on the stiffness of combined roller and plain bearings // Proc. Manufactur. 2019. V. 41. P. 650–657.
2. **Ruan H., Zhang Y., Li S., et al.** Effect of temperature on the friction and wear performance of porous oil-containing polyimide // Tribol. Intern. 2021. V. 157. 106891.
3. **Song F., Wang Q., Wang T.** The effects of crystallinity on the mechanical properties and the limiting PV (pressure  $\times$  velocity) value of PTFE // Tribol. Intern. 2016. V. 93. P. 1–10.
4. **Dong Z., Chen B., Zhang M., et al.** One-step preparation of carbon fiber-ZrO<sub>2</sub> hybrid and its enhancement on the wear-resistant properties of polyimide // Polymer. Composit. 2021. V. 42, N 5. P. 2598–2607.

5. **McKeen L. W.** The effect of UV light and weather on plastics and elastomers. Norwich: William Andrew Publ., 2019.
6. **Kricheldorf H. R.** Progress in polyimide chemistry. 1. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
7. **Fang Q., Wang J., Gu S., et al.** 3D porous crystalline polyimide covalent organic frameworks for drug delivery // J. Amer. Chem. Soc. 2015. V. 137. P. 8352–8355.
8. **Constantin C. P., Aflori M., Damian R. F., Rusu R. D.** Biocompatibility of polyimides: A mini-review // Materials. 2019. V. 12. 3166.
9. **Su F., Zhang S.** Tribological properties of polyimide coatings filled with PTFE and surface-modified nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> // J. Appl. Polymer. Sci. 2014. V. 131, N 12. 40410.
10. **Kumar R., Malaval B., Antonov M., Zhao G.** Performance of polyimide and PTFE based composites under sliding, erosive and high stress abrasive conditions // Tribol. Intern. 2020. V. 147. 106282.
11. **Mu L., Zhu J., Fan J., et al.** Self-lubricating polytetrafluoroethylene/polyimide blends reinforced with zinc oxide nanoparticles // J. Nanomaterials. 2015. V. 2015. P. 1–8.
12. **Shi Y., Mu L., Feng X., Lu X.** The tribological behavior of nanometer and micrometer TiO<sub>2</sub> particle-filled polytetrafluoroethylene/polyimide // Materials Design. 2011. V. 32, N 2. P. 964–970.
13. **Gheisari R., Polycarpou A. A.** Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions // Wear. 2019. V. 436/437. 203044.
14. **Panin S. V., Luo J., Kornienko L. A., et al.** Mechanical and tribotechnical properties of polyimide based solid lubricant composites // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2167. 020266.
15. **Chen B., Li X., Jia Y., et al.** MoS<sub>2</sub> nanosheets-decorated carbon fiber hybrid for improving the friction and wear properties of polyimide composite // Composites. Pt A. 2018. V. 109. P. 232–238.
16. **Song F., Wang Q., Wang T.** High mechanical and tribological performance of polyimide nanocomposites reinforced by chopped carbon fibers in adverse operating conditions // Composites Sci. Technol. 2016. V. 134. P. 251–257.
17. **Beev A. A., Khashirova S. Y., Beeva D. A., et al.** Carbon and glass fibers for polymer composites // Key Engng Materials. 2019. V. 816. P. 19–26.
18. **Hassanzadeh-Aghdam M. K., Ansari R., Darvizeh A.** Micromechanical modeling of thermal expansion coefficients for uni-directional glass fiber-reinforced polyimide composites containing silica nanoparticles // Composites. Pt A. 2017. V. 96. P. 110–121.
19. **Panin S. V., Luo J., Alexenko V. O., et al.** The effect of annealing of milled carbon fibers on the mechanical and tribological properties of solid-lubricant thermoplastic polyimide-based composites // Polymer Engng Sci. 2020. V. 60, N 9. P. 1–14.
20. **Панин В. Е., Моисеенко Д. Д., Панин С. В. и др.** Механизмы демпфирования упругой энергии в переходном слое между покрытием и подложкой в условиях контактного взаимодействия // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 2. С. 148–158.
21. **Panin S. V., Lyukshin B. A., Vochkareva S. A., et al.** Material design methodology for optimized wear-resistant thermoplastic-matrix composites based on polyetheretherketone and polyphenylene sulfide // Materials. 2020. V. 13. 524.
22. **Панин С. В., Люкшин Б. А., Бочкарева С. А.** Проблемы и перспективы компьютерного конструирования новых композиционных материалов // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 5. С. 168–174.

*Поступила в редакцию 8/VII 2021 г.,  
после доработки — 13/VII 2021 г.  
Принята к публикации 26/VII 2021 г.*