

УДК 678.83

Г.С. Кулагина¹, А.В. Коробова¹, С.В. Зуев¹, Г.Ф. Железина¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ТКАНОГО АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-6-6

Исследованы антифрикционные органопластики, армированные тканями, содержащими политетрафторэтиленовые (ПТФЭ) волокна или волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Показано, что коэффициенты трения в парах «органопластик–сталь» и «органопластик–углепластик» изменяются в диапазоне 0,07–0,20 в зависимости от нагрузки и скорости скольжения (0,8–3,2 МПа; 0,1–0,45 м/с), при этом установлен крайне низкий весовой износ. Органопластики рекомендованы как антифрикционные покрытия для тяжело нагруженных подшипников скольжения в условиях сухого трения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: коэффициент трения, трибологические свойства, антифрикционные органопластики, антифрикционные покрытия, армирующий тканый наполнитель, политетрафторэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен.

Antifriction organoplastics reinforced with fabrics with polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers or ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers are investigated. It is shown that friction coefficients in pairs «organoplastic–steel» and «organoplastic–carbon-filled plastic» change in the range of 0,07 to 0,20 depending on load and sliding speed (0,8–3,2 MPa; 0,1–0,45 m/s) with extremely low weight wear. Organoplastics are recommended as antifriction coatings for heavy-loaded sliding bearings in condition of dry friction.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 13. «Polymer composite materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: friction coefficient, tribological properties, antifriction organoplastics, antifriction coatings, a reinforcing fabric filler, polytetrafluoroethylene, ultrahigh molecular weight polyethylene.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время к одним из наиболее эффективных антифрикционных материалов для изготовления подшипников сухого трения относят органопластики – композиционные материалы на основе синтетических волокон. Как правило, они представляют собой композиты, усиленные полиэфирными, арамидными, хлопчатобумажными, арселеновыми и другими тканями или волокнами и успешно сочетают высокие физико-механические и антифрикционные свойства [2–9]. Улучшение антифрикционных характеристик органопластиков достигается введением в полимерную матрицу дополнительных функциональных добавок, например, дисульфида молибдена, политетрафторэтилена (ПТФЭ), графита и т. п. [2, 5, 10, 11]. Такие модификаторы снижают ко-

эффицент трения за счет постепенного высвобождения на поверхности трения новых порций антифрикционного наполнителя.

Во ФГУП «ВИАМ» проводятся разработка и исследование свойств антифрикционных полимерных композиционных материалов – органопластиков, предназначенных для работы в тяжело нагруженных узлах сухого трения [12, 13]. Их отличительной особенностью является применение комбинированного тканого наполнителя, благодаря своей структуре выполняющего функцию и армирующего, и антифрикционного компонентов. В качестве армирующей составляющей ткани используются полиимидные (ПИ) или полиамидные волокна (ПА), в качестве антифрикционной – ПТФЭ- или СВМПЭ-волокна (сверхвысокомолекулярный полиэтилен). Исследуемые материалы изготавливают через стадию получения препрегов, из которых впоследствии формируется органопластик в виде покрытия на какой-либо поверхности, что является удобным для формирования антифрикционных накладок в различных механизмах и агрегатах.

Преимуществами органопластиков на основе комбинированных тканых наполнителей являются сочетание высоких антифрикционных свойств, износостойкости, стабильной работоспособности в тяжело нагруженных узлах трения скольжения, а также возможность использования антифрикционных органопластиков в виде накладок на различных поверхностях трения [12]. Перспективой развития таких материалов является создание препрегов на основе различных полимерных матриц и типов наполнителей, которые позволят регулировать технологические и эксплуатационные свойства антифрикционного покрытия.

Однако в настоящее время отсутствует комплексная информация о трибологических свойствах органопластиков на основе комбинированных тканых наполнителей при формировании узлов трения с различными поверхностями и варьировании нагрузочно-скоростных режимов, что является актуальным для выявления оптимальных параметров эксплуатации антифрикционных органопластиков.

Целью данной работы являлось проведение сравнительных исследований антифрикционных свойств органопластиков на основе полимерных матриц эпоксидного или фенольного типов, армированных комбинированными ткаными наполнителями состава ПТФЭ–ПИ или СВМПЭ–ПА. Основные задачи заключались в определении закономерностей влияния нагрузок и скоростей скольжения, а также состава материала на трибологические свойства органопластиков.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись антифрикционные органопластики, армированные комбинированной двухсторонней полимерной тканью. Использовали два вида тканей: на основе политетрафторэтиленовых и полиимидных волокон (ткань ПТФЭ–ПИ); на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и арамидных волокон (ткань СВМПЭ–ПА). Для формирования полимерной матрицы выбраны расплавное эпоксидное связующее ВСЭ-40 (ТУ1-595-12-1502–2015) и растворное фенолокаучуковое связующее АФК-101 (ТУ1-595-11-906–2006). Типы связующих, армирующих наполнителей и некоторые их свойства представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики марок полимерных связующих

Связующее	Состав	Массовая доля нелетучих веществ в исходном связующем, %	Температура эксплуатации отвержденного связующего, °С
АФК-101 (ТУ1-595-11-906–2006)	Растворное связующее на основе фенолформальдегидных смол; растворители: ацетон и этилацетат	30	От -60 до +20
ВСЭ-40 (ТУ1-595-12-1502–2015)	Расплавное связующее на основе эпоксидных смол	100	От -60 до +60

Таблица 2

Характеристики армирующих наполнителей

Армирующий наполнитель	Состав	Поверхностная плотность ткани, г/м ²
Ткань ПТФЭ–ПИ (арт. 5392-81, ТУ8278-124-35227510–2005)	Комбинированная двухсторонняя ткань из нитей ПТФЭ и ароматического ПИ	350
Ткань СВМПЭ–ПА (экспериментальный образец)	Комбинированная двухсторонняя ткань из нитей СВМПЭ и ароматического ПА	220

Изготовление органопластиков осуществляли в два этапа:

- изготовление препрега органопластика;
- формование органопластика из препрега.

Получение препрегов на основе растворного связующего АФК-101 проводили методом пропитки на установке типа УПСТ-1000М. Температура сушки препрега составляла 70–80°C. Изготовление препрега с применением расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-40 осуществляли на установке Coatema LS-11 по расплавной технологии при температуре 70°C [14, 15]. Процесс получения органопластика на основе фенольного связующего АФК-101 из препрега проводили при температуре его отверждения 200°C в течение 3 ч. Получение органопластика с эпоксидным связующим ВСЭ-40 осуществляли из препрега при температуре 130°C течение 4 ч. В табл. 3 приведены исследуемые в данной работе органопластики, а также некоторые их характеристики.

Таблица 3

Характеристики антифрикционных органопластиков

Связующее	Армирующий наполнитель	Условное обозначение органопластика	Массовая доля связующего в исходном препреге, %	Толщина органопластика, мкм	Температура эксплуатации органопластика, °С
АФК-101	Ткань ПТФЭ–ПИ	I	18	280	От -60 до +200
ВСЭ-40	Ткань ПТФЭ–ПИ	II	24	280	От -60 до +60
		III	35	300	
		IV	24	300	
		V	46	330	
	Ткань СВМПЭ–ПА				

Изготовление углепластика осуществляли из препрегов на основе углеродных тканей фирмы Porcher (арт. 3105) и расплавного связующего марки ВСЭ-40 в условиях, аналогичных условиям получения органопластика с использованием связующего ВСЭ-40, описанных ранее.

Трибологические испытания органопластиков приводили на установке И-47 в режиме сухого трения на воздухе при температуре 20±1°C. Вид сопряжения – торцевое трение. Скорость скольжения изменялась в диапазоне от 0,10 до 0,45 м/с, удельная нагрузка – от 0,8 до 3,2 МПа. Продолжительность испытания при каждом режиме составляла 1 ч.

Образцы пар трения представляют собой цилиндры, выполненные из стали 30ХГСА, с нанесенным на торцевую поверхность покрытием органопластика, углепластика либо без покрытия.

Коэффициент трения (f) определяли согласно формуле:

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{r \cdot P_{\text{ос}}},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения, кг·см; r – средний радиус образцов, см; $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на образцы, кг.

Интенсивность весового износа определяли как удельный весовой износ (I_g) согласно уравнению:

$$I_g = \frac{\Delta G}{F_{\text{тр}} \cdot \rho \cdot L},$$

где ΔG – весовой износ (разность между массой образца до и после испытаний), г; $F_{\text{тр}}$ – площадь трения, см²; ρ – плотность материала, г/см³; L – путь трения, см;

$$F_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}}^2 - \pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4},$$

где $d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр, см; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр, см.

Результаты

В данной работе изучены два типа трибосопряжения в условиях сухого трения: «органопластик–сталь» и «органопластик–углепластик». Углепластик в качестве контртела выбран в связи с тем, что является перспективным материалом, способным полностью или частично заменить металлические детали и конструкции в различных областях машиностроения. Хотя углепластики сами по себе относятся к износостойким антифрикционным материалам, при этом они являются анизотропными материалами, в которых влияние ориентации волокон определяет трибологические характеристики, т. е. в зависимости от направления приложения нагрузки возможно разрушение поверхности трения углепластика, нарушение ее сплошности. При контакте с некоторыми марками стали наблюдается перенос частиц металла на поверхностный слой углепластика [2], поэтому в ряде случаев требуется повышение антифрикционных характеристик углепластика.

В связи с вышеизложенным, на первом этапе работы получены данные о коэффициентах трения для пары «углепластик–углепластик». Поскольку трибосопряжение проводили в режиме торцевого трения, то влияние направления приложения нагрузки в данном случае нивелировалось. Исследовали композиционный материал на основе углеродной ткани и эпоксидного связующего ВСЭ-40 при нагрузках 0,8–1,5 МПа и скоростях скольжения 0,12 и 0,24 м/с (рис. 1). Видно, что в этом нагрузочно-скоростном диапазоне коэффициент трения изменяется от 0,3 до 0,45. Хотя полученные показатели позволяют относить исследуемые углепластики к антифрикционным, однако для современных самосмазывающихся материалов такие значения являются достаточно высокими. Для улучшения трибологических характеристик предложено использовать антифрикционное покрытие на основе органопластика, которое позволит увеличить срок службы изделия. Кроме того, это не внесет дополнительных изменений в технологический процесс изготовления углепластика, так как возможно нанесение покрытия непосредственно при его формовании.

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки для образцов органопластиков различного состава при контакте с углепластиком. Скорость скольжения изменялась в интервале от 0,12 до 0,45 м/с, а удельная нагрузка – от 0,8 до 3,3 МПа. Видно, что коэффициент трения в паре «органопластик–углепластик» (рис. 2, кривая 3) при прочих равных условиях в 2,2–2,8 раза ниже по сравнению с парой трения «углепластик–углепластик» (рис. 1). Это подтверждает высокую эффективность

использования исследуемых материалов в качестве антифрикционных покрытий при данных условиях нагружения.

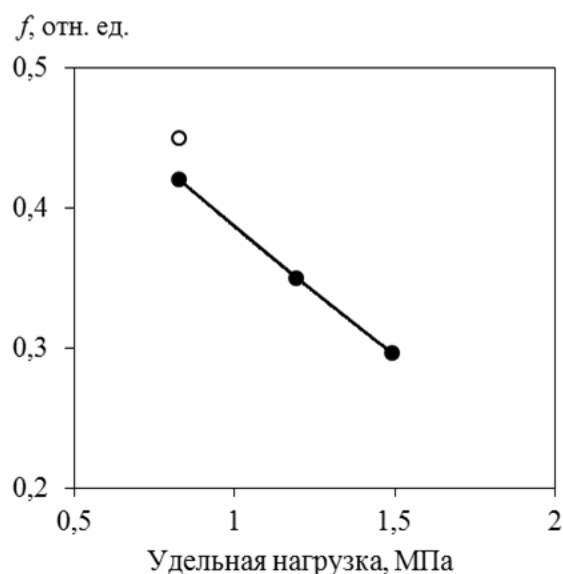


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения (f) от удельной нагрузки для пар трения «углепластик–углепластик» при скорости скольжения 0,12 (●) и 0,24 м/с (○)

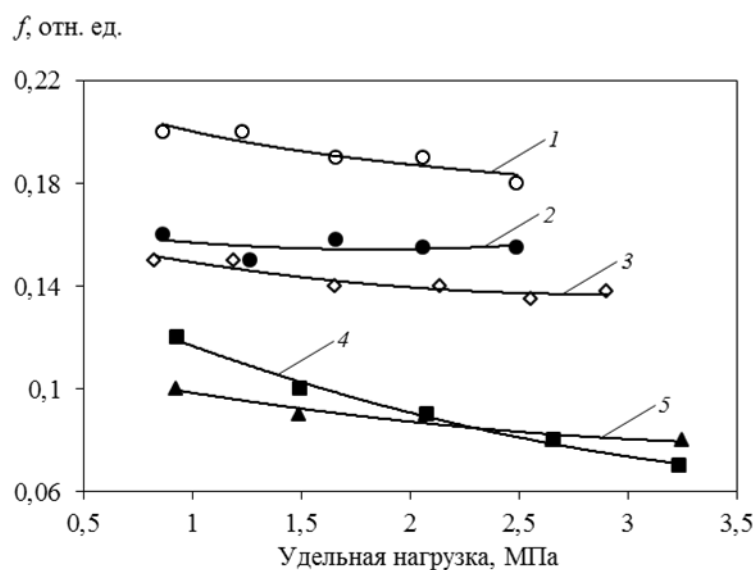


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения (f) от удельной нагрузки для пар трения «органопластик–углепластик» при скорости скольжения, м/с: 0,12 (3); 0,3 (2, 4, 5); 0,45 (1). Тип органопластика: I (1, 2, 3); II (5); IV (4)

Видно, что кривые зависимостей коэффициента трения от удельной нагрузки имеют классический вид – в указанном нагрузочно-скоростном диапазоне наблюдается либо небольшое снижение значений f с увеличением нагрузки, либо его значения практически не изменяются. Влияние скорости скольжения на антифрикционные свойства показано на рис. 3. С ростом скорости при прочих равных условиях наблюдается увеличение коэффициента трения, обусловленное, вероятно, ростом температуры в зоне контакта.

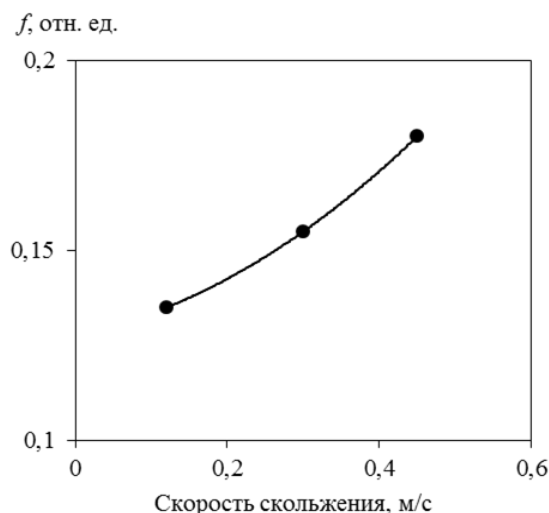


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения (f) от скорости скольжения для пары трения «органопластик–углепластик» при удельной нагрузке 2,5 МПа. Тип органопластика – I

Механизм работы антифрикционных органопластиков, армированных комбинированной тканью (ПТФЭ–ПИ или СВМПЭ–ПА), реализуется путем формирования на поверхности контакта двух тел самосмазывающейся пленки антифрикционного компонента (волокна ПТФЭ или СВМПЭ), которая пролонгировано возобновляется в процессе трения. На рис. 4 в качестве примера показаны оптические микрофотографии* органопластика на основе комбинированного тканого наполнителя (ткань ПТФЭ–ПИ) и эпоксидной полимерной матрицы ВСЭ-40. На них отчетливо видны нити из волокон двух типов, переплетенные так, что на каждой стороне ткани преимущественно расположены нити либо из антифрикционных волокон ПТФЭ (рис. 4, а), либо из армирующих волокон ПИ (рис. 4, б). Это обеспечивает благодаря поверхности с антифрикционным компонентом низкие значения коэффициента трения, а за счет армирующего наполнителя – усиление композиционного материала, повышение его износостойкости, а также увеличение адгезионной прочности наполнителя по отношению к полимерной матрице. Полимерная матрица выполняет функцию формирования монолитной структуры органопластика, а также обеспечивает высокую прочность сцепления с основой различной природы (металл, углепластик и т. п.).

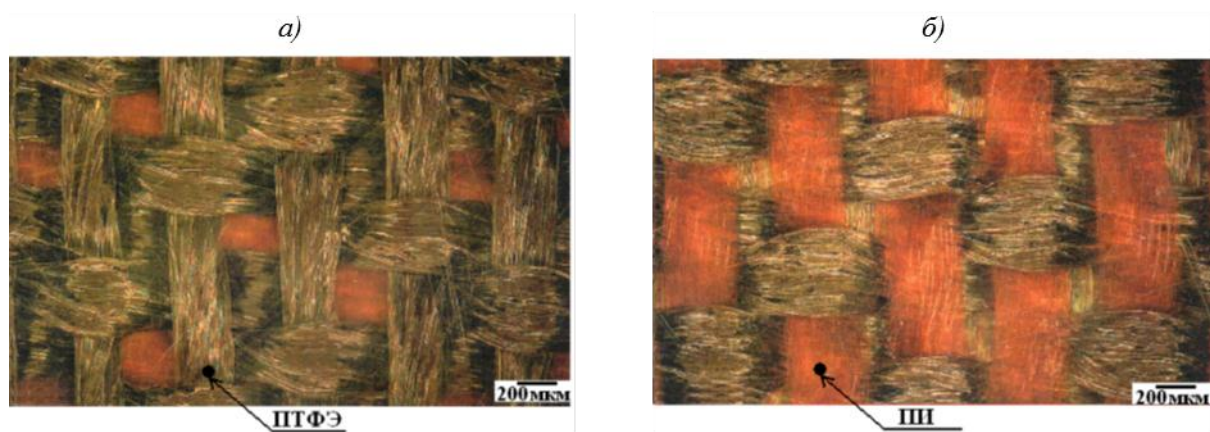


Рис. 4. Микроструктура поверхности органопластика на основе двухсторонней комбинированной ткани из ПТФЭ- и ПИ-нитей и эпоксидного связующего:

а – вид поверхности со стороны, обогащенной ПТФЭ-волокнами; б – вид со стороны, обогащенной ПИ-волокнами

* Микрофотографии получены в лаборатории полимерных связующих ФГУП «ВИАМ» И.С. Деевым.

На рис. 2 прослеживается влияние состава антифрикционного органопластика на коэффициент трения в паре «органопластик–углепластик». Так, при скорости скольжения 0,3 м/с для органопластиков на основе эпоксидного связующего ВСЭ-40 и различных наполнителей (ткани СВМПЭ–ПА или ПТФЭ–ПИ) получены сходные значения f , изменяющиеся в диапазоне от 0,07 до 0,12. Использование фенолокаучукового связующего АФК-101, как показано на примере органопластика, армированного тканью ПТФЭ–ПИ, приводит к некоторому увеличению коэффициента трения до 0,15–0,16. Известно, что полимерная матрица в процессе трения за счет механической или механо-химической (в зависимости от природы полимеров) деструкции разрушается с образованием микрочастиц различного размера, которые оказывают влияние на формирование поверхности контакта [2, 4].

Проанализировали также влияние количества полимерного связующего в органопластике на его антифрикционные свойства. Показано, что увеличение доли связующего в пределах от 24 до 35% (по массе) в составе органопластика на основе ткани ПТФЭ–ПИ мало сказывается на значениях коэффициентов трения (рис. 5, а, кривые 1 и 2). Тогда как возрастание доли связующего с 24 до 46% (по массе) для органопластика на основе ткани СВМПЭ–ПА, особенно при малых нагрузках, уже повышает значения f в 1,5 раза – с 0,12 до 0,18 (рис. 5, б, кривые 3 и 4). С увеличением нагрузки эта разница снижается – так, при удельной нагрузке 3,2 МПа значения коэффициента трения уже практически не зависят от содержания связующего и составляют 0,07–0,08. Вероятно, частицы полимерной матрицы, образующиеся на поверхности трения, при низких нагрузках являются более крупными и способны в большей степени оказывать негативное воздействие на трибологические характеристики органопластиков.

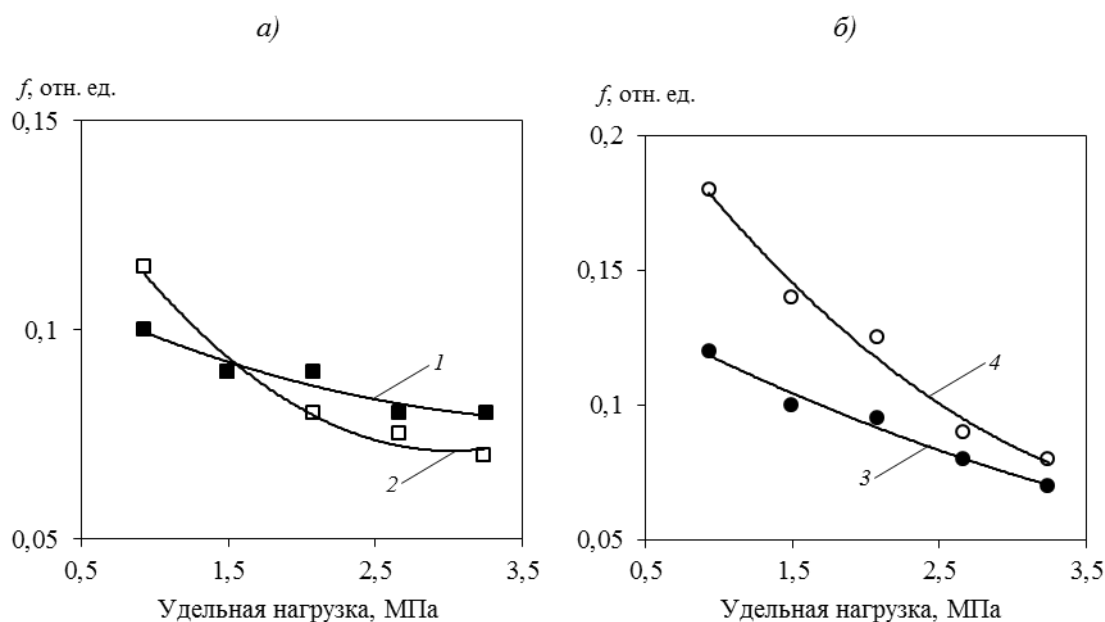


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения (f) от удельной нагрузки для пар трения «органопластик–углепластик» при скорости скольжения 0,3 м/с. Тип органопластика: II (3); III (4); IV (1); V (2)

Сравнение трибологического поведения органопластиков на основе комбинированных тканых наполнителей при трении со сталью показало, что характер и механизм трения в исследуемом диапазоне скоростей и нагрузок совпадает с результатами, описанными ранее (рис. 6), т. е. с увеличением нагрузки и уменьшением скорости скольжения коэффициент трения уменьшается. При этом для пар трения «органопластик–

сталь» его значения выше в $\sim 1,3-1,5$ раза по сравнению с парой трения «органопластик–углепластик».

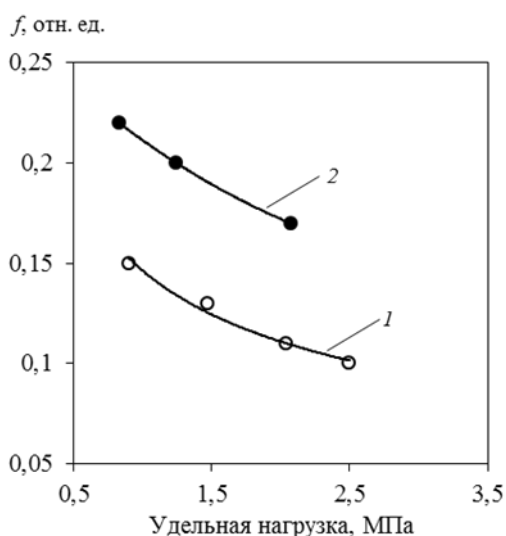


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения (f) от удельной нагрузки для пар трения «органопластик–сталь» при скорости скольжения 0,12 м/с. Тип органопластика: III (1); V (2)

Данные по износостойкости на примере органопластика типа II на основе ткани ПТФЭ–ПИ и эпоксидного связующего ВСЭ-40 представлены в табл. 4. Видно, что исследуемые материалы имеют повышенную износостойкость при трении как с углепластиком, так и со сталью, и, следовательно, могут быть рекомендованы как высокоэффективные покрытия триботехнического назначения.

Таблица 4

Износостойкость образцов органопластика типа II в условиях сухого трения

Материал контртела	Условный номер образца	ΔG , г	$I_g \cdot 10^8$	Среднее значение $I_g \cdot 10^8$
Углепластик	1	0	0	0,46
	2	0,001	1,15	
	3	0	0	
	4	0,001	1,15	
	5	0	0	
Сталь 30ХГСА	1	0	0	0,23
	2	0	0	
	4	0,001	1,15	
	4	0	0	
	5	0	0	

Обсуждение и заключения

В результате получены сравнительные характеристики антифрикционных свойств органопластиков на основе эпоксидного (ВСЭ-40) и фенолокаучукового (АФК-101) связующих и комбинированных тканей различного состава (ПТФЭ–ПИ и СВМПЭ–ПА) в парах трения «органопластик–углепластик» и «органопластик–сталь».

Показано, что в исследуемом диапазоне нагрузочно-скоростных параметров коэффициенты трения в парах трения «органопластик–углепластик» и «органопластик–сталь» изменяются в интервале от 0,07 до 0,20 в зависимости от скорости скольжения, нагрузки, типа органопластика. Так, значение f снижается с увеличением нагрузки,

уменьшением скорости скольжения и содержания полимерного связующего в составе органопластика, а также достигается заменой фенолокаучукового связующего на эпокси-дное. При этом значения весового износа в парах трения «органопластик–углепластик» и «органопластик–сталь» крайне малы. Это позволяет исследуемые органо-пластики относить к высокоэффективным материалам антифрикционного назначения и рассматривать их как перспективные материалы для использования в качестве покрытий в тяжело нагруженных узлах трения (металл, углепластик), работающих без смазки в течение всего срока эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справочник / под общ. ред. И.В. Горынина и А.С. Орыщенко. СПб.: Профессional, 2012. 916 с.
3. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
4. Бухин В.Е., Евсеев В.Н., Постников Ю.А., Федосеева А.Ю. Полимерные материалы для узлов трения // *Технология, организация производства и управления, обзорная информация*. НИИЭинформэнергомаш. 1987. Вып. 15. С. 1–33.
5. Адаменко Н.А., Агафонова Г.В. Триботехнические полимерные материалы. Волгоград: ВолгГТУ, 2013. 107 с.
6. Сиренко Г.А., Свицерский В.П., Герасимов В.Д., Никонов В.З. Антифрикционные термостойкие полимеры. Киев: Техніка, 1978. 246 с.
7. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Теплостойкие антифрикционные текстолиты // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №11. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-4-4.
8. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.
9. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Балышко И.В., Гинзбург Б.М., Кирик Е.В., Точильников Д.Г. Характеристики органопластиков на основе фенольной матрицы и оксоланового волокна // *Вопросы материаловедения*. 2006. №2. С. 113–118.
10. Юдин А.С. Разработка износостойких, антифрикционных органотекстолитов на основе полиоксадиазольных тканей и полимер-минеральных модификаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 20 с.
11. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Y. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites // *Nanotechnologies in Russia*. 2013. Т. 8. №3–4. С. 163–185.
12. Бейдер Э.Я., Донской А.А., Железина Г.Ф., Кондрашов Э.К., Сытый Ю.В., Сурнин Е.Г. Опыт применения фторполимерных материалов в авиационной технике // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII. №3. С. 30–44.
13. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
14. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавленным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
15. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №2. С. 38–42.