

А. А. Адамов^{а}, И. Э. Келлер^а, С. Г. Острер^б, Д. В. Селетков^в*

^аИнститут механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

^бООО “АльфаТех”, Пермь, Россия

^вООО “Пермский завод фторопластовых изделий”, Россия

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ
ПТФЭ-КОМПОЗИТОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ СВЫШЕ 60 МПа
I. СРАВНЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОГО И СТЕСНЕННОГО СЖАТИЯ**

A. A. Adamov, I. E. Keller, S. G. Ostrer, and D. V. Seletkov*

**EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF ANTIFRICTION PTFE
COMPOSITES AT A PRESSURE OVER 60 MPa**

**I. COMPARISON OF THEIR HARDNESS AND DEFORMATION PROPERTIES
UNDER FREE AND CONSTRAINED COMPRESSION**

Keywords: antifriction polymer materials, polytetrafluoroethylene composites, experiment, mechanical characteristics, free compression, constrained compression

The mechanical characteristics of a number of antifriction polymer materials at room temperature are studied to analyze their operability in the bearings of support parts with a ball segment. In the published literature, no data were found corresponding to the specifics of the operation of the antifriction layer in such structures. It consists in high contact pressures (at least 60 MPa) and the reciprocating nature of friction according to the plane-on-plane scheme with polished stainless steel as a counterbody, which motivated this systematic study. According to the unified technology of dry mixing, pressing and free sintering, six tablet samples were prepared for each of the 19 types of compositions of fluoroplastic powders and various fillers with a dispersion from units to tens of micrometers (coke, bronze, carbon fiber, colloidal and thermally expanded graphite, molybdenum disulphide and their combinations). For all materials, by the author's

*Автор, с которым следует вести переписку: adamov@icmm.ru
Corresponding author: adamov@icmm.ru

method, the Brinell hardness, the proportions of strains with different rheology in the total deformation, Young's modulus, and stresses in free compression corresponding to strains of 1, 5 and 10%, stiffness in constrained compression, corresponding to stresses of 50, 100, and 150 MPa, and their dependence on the presence of a hole (empty or filled with grease) were determined. All tests were performed according to a multistage program with loading and unloading cycles, relaxation, and rest periods. The best mechanical characteristics showed composites with 50 wt% dendritic or coarse-grained bronze and an addition of 5% colloidal graphite, which manifested itself as a dry lubricant and effectively increased the stiffness. The data obtained, together with tribological characteristics (will be published in the second part), can serve as the basis for the selection of antifriction materials (their composition and manufacturing technologies) for bridge support units.

Ключевые слова: материалы полимерные антифрикционные, композиты на основе политетрафторэтилена, эксперимент, характеристики механические, свободное сжатие, стесненное сжатие

Исследованы механические характеристики некоторых антифрикционных полимерных материалов при комнатной температуре для анализа их работоспособности в подшипниках опорных частей с шаровым сегментом. В опубликованной литературе не выявлено данных, отвечающих специфике работы антифрикционного слоя в подобных конструкциях — высоким контактным давлениям (не менее 60 МПа) и возвратно-поступательному характеру трения по схеме плоскость по плоскости с полированной нержавеющей сталью в качестве контртела, что мотивировало проведение данного систематического исследования. По единой технологии сухого смешивания, прессования и свободного спекания подготовлено по шесть образцов-таблеток для каждого из 19 видов композитов на основе порошков политетрафторэтилена и различных наполнителей с дисперсностью от единиц до десятков микрометров — кокса, бронзы, углеволокна, коллоидного и терморасширенного графитов, дисульфида молибдена и их сочетаний. Для всех материалов определены твердость по Бринеллю, доля деформаций с разной реологией в полной деформации, модуль Юнга и напряжение при свободном сжатии, соответствующие деформации 1, 5 и 10%, жесткость при стесненном сжатии, соответствующая напряжению 50, 100 и 150 МПа, и их зависимость от наличия лунки — пустой или заполненной смазкой. Все испытания выполняли по многоступенчатой программе с циклами нагружения, разгрузки и периодами релаксации и отдыха. Лучшие механические характеристики показали композиты с 50% по массе дендритной или крупнозернистой бронзы с добавлением 5%

коллоидного графита, который проявляет себя как сухая смазка и эффективно увеличивает жесткость. Полученные данные совместно с трибологическими характеристиками (планируется опубликовать во второй части) могут служить основой выбора антифрикционных материалов (их рецептур и технологий изготовления) для шарниров мостовых опор.

1. Необходимость проведения исследования

Конструкция опорной части с шаровым сегментом, применяемая при строительстве мостов, содержит сферический и плоский тонкие слои (отношение толщины к диаметру менее 0,05) антифрикционного полимерного материала, работающие при высоких контактных давлениях и снижающие силы трения от возвратно-поступательных угловых и линейных смещений шарового сегмента [1, 2]. На материал антифрикционных слоев накладываются высокие требования на весь срок гарантированной эксплуатации изделия (50 лет) в диапазоне температур от -60 до 50 °С. Жесткость и предел текучести в условиях стесненного сжатия, преобладающего в данном слое, должны быть достаточны, чтобы материал выдерживал как расчетные значения сжимающей нагрузки не менее 60 МПа, так и ее пиковые значения до 150 МПа при нормированном размахе деформаций. Деформация, связанная с твердофазным течением материала в процессе эксплуатации изделия, не должна приводить к заплыванию лунок для смазки на контактной поверхности слоя и краевой экструзии слоя. Определяющими для выбора материала являются ограничения на коэффициент трения и износостойкость при возвратно-поступательном скольжении по полированной стальной поверхности при расчетных значениях контактного давления. Данные требования закладываются при расчетах мостовых опор и определяют их работоспособность.

Для выбора антифрикционных полимерных материалов (АПМ), пригодных для применения в опорных частях с шаровым сегментом в соответствии с требуемыми механическими и трибологическими характеристиками, существуют требования ОАО «РЖД» [3], проект стандарта Росавтодора, программы испытаний для скользящих материалов, подвергающихся высоким нагрузкам [4, 5], разработанные Немецким институтом строительной техники, и научная литература [6—8]. В основном эти руководства посвящены методикам аттестации трибологических характеристик АПМ, которые имеют заметную чувствительность к температурам и нормальным давлениям в указанном диапазоне. Механические характеристики композитных материалов (КМ) (особенно на основе политетрафторэтилена) относительно более стабильны в зависимости от температуры, поэтому указанные методики ограничиваются набором стандартных испытаний. Методики [4, 5] не содержат пороговых значений характеристик. Опыт аттестации АПМ для изделий ООО «АльфаТех»

Табл. 1

Требования к механическим и трибологическим характеристикам АПМ

Номер	Характеристика АПМ	Предельное значение
1	Твердость по Бринеллю HB_5 ($F = 132$ Н, диаметр шарика 5 мм) при температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$ по ГОСТ 4670-2015	≥ 40 МПа
2	Модуль Юнга E в условиях свободного сжатия при скорости деформации 5%/мин и температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$ по ГОСТ 4651-2014	≥ 800 МПа
3	Напряжение при деформации 5% в условиях свободного сжатия при скорости деформации 50%/мин и температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$ по ГОСТ 4651-2014	≥ 18 МПа
4	Напряжение при деформации 10% в условиях свободного сжатия при скорости деформации 50%/мин и температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$ по ГОСТ 4651-2014	≥ 23 МПа
5	Размах деформаций на третьем цикле циклического стесненного сжатия до 160 МПа при скорости деформации 2%/мин и температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$	$\leq 5\%$
6	Касательный модуль h к диаграмме нагружения при 100 МПа на третьем цикле циклического стесненного сжатия до 160 МПа при скорости деформации 2%/мин и температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$	$\geq 4,2$ ГПа
7	Коэффициент трения скольжения со смазкой ЦИАТИМ-221F по полированной нержавеющей стали с шероховатостью $Ra = 0,16$ при напряжении сжатия от 30 до 60 МПа при температуре $23 \pm 3^\circ\text{C}$	$\leq 0,03$
8	Коэффициент трения покоя (страгивания) со смазкой ЦИАТИМ-221F по полированной нержавеющей стали с шероховатостью $Ra = 0,16$ в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$ при напряжении сжатия от 30 до 60 МПа	$\leq 0,08$
9	Коэффициент износа при возвратно-поступательном смещении по схеме плоскость—плоскость при контакте по полированной нержавеющей стали с шероховатостью $Ra = 0,16$ со смазкой ЦИАТИМ-221F в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$ при напряжениях сжатия от 30 до 60 МПа	$\leq 0,026$ мм/км

позволил выработать более специализированные требования (табл. 1) для испытаний механических свойств материала, предполагающие использование стандартных и оригинальных методов (оснастки, программ и средств обработки результатов) [9—11].

В качестве антифрикционных полимерных материалов в подобных изделиях широко применяются КМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), обладающего высокой стабильностью свойств и исключительно низким коэффициентом трения скольжения и покоя в интересующем диапазоне температур. Введение в основу разных наполнителей помогает без значительного увеличения коэффициентов трения существенно повысить износостойкость, жесткость и предел текучести, а также понизить ползучесть композитного материала [12—14], что требуется условиями эксплуатации.

Дизайну наполненных фторкомпозитов и систематическому сравнению их механических и трибологических характеристик посвящена обширная

литература [12—34]. Например, в [15] выполнен сравнительный анализ 31 композита на основе ПТФЭ. В каждой из работ по единой методике изготавливали образцы разных композитных материалов, которые подвергались испытаниям. Технология изготовления образцов заключалась в смешивании порошков ПТФЭ и наполнителей в высокоскоростной мешалке, прессовании образцов-таблеток при давлении 30—50 МПа и их спекании в свободном состоянии при температуре 360—380°C с последующим охлаждением в печи. Эта технология относительно проста и используется при массовом производстве. У заготовок контролировали плотность, степень кристалличности и однородность распределения наполнителей.

В зависимости от назначения антифрикционного материала реализовывались разные программы испытаний. Как правило, определяли модуль Юнга, твердость, предел текучести и прочности в испытаниях на растяжение и свободное сжатие и характеристики ползучести с применением разных методик и средств. Можно отметить исследования свойств ползучести и релаксации материала вдавливанием цилиндрического [25] или сферического [26] инденторов, а также циклической ползучести (рэтчетинга) при испытаниях на одноосное растяжение с помощью динамического механического анализатора [23] или на циклическое свободное сжатие [34]. Ни в одной из этих работ программа испытаний не обеспечивает данными для идентификации трехмерной модели вязкоупругопластичности. Только в одной из цитированных работ напряжение сжатия достигало 100 МПа [25]. Необходимые данные о механических характеристиках применяемых в конструкциях мостовых опор полимерных антифрикционных материалов Fluorogold (Seismic Energy Products, США) на основе ПТФЭ, а также MSM (Maurer Sohne, Германия) и Robo®Slide (Mageba, Швейцария) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена [1] не опубликованы.

В контексте поставленной задачи интересуют трибологические характеристики (коэффициенты трения и износостойкость) антифрикционного материала при трении о полированную сталь по схеме плоскость по плоскости для указанных диапазонов температур и контактных давлений. В опубликованных работах по определению трибологических характеристик наполненных фторкомпозитов условия испытаний и смысл этих характеристик значительно различаются. В использованных устройствах реализуются схемы с относительным вращением (диск—палец [12, 16, 19, 27], вал—колодка [19], вал—штулка [28-32], вал—плоскость [12] или шар—кольцо [12]) или возвратно-поступательным смещением (плоскость—плоскость [7, 15, 20—22], шарик—плоскость [26]), однако ни одно из них не было рассчитано для давления 60 МПа и выше. Рекомендации применения некоторых АПМ для узлов трения с высокими давлениями [24] также сделаны на основании данных испытаний с контактным давлением до 10 МПа. Пороговые значения нормируемых характеристик в рамках методик испытаний материалов для слоев скольжения мостовых опор [4—8] не опубликованы, что усложняет выбор АПМ производителями мостовых опор.

Таким образом, имеющихся экспериментальных данных недостаточно для выбора подходящего под требования (см. табл. 1) материала и необходимо выполнение специального систематического исследования для значительно более высоких давлений и возвратно-поступательного характера трения. Следует отметить, что основная часть тонкого слоя АПМ находится в состоянии стесненного сжатия, за исключением областей вблизи краев и лунок, где реализуется состояние, промежуточное между стесненным и свободным сжатием. Это обуславливает особую важность изучения механических характеристик материала в этих состояниях. Программа механических испытаний должна обеспечивать возможность идентификации пространственной модели вязкоупругопластичности, необходимой для расчетов поведения антифрикционных слоев в опорной части с шаровым сегментом. При этом поиск подходящих составов целесообразно начинать из производимых промышленностью композиций и смесей с традиционными наполнителями для повышения жесткости и износостойкости (бронза, кокс, углеволокно) и сухими смазками (графит, дисульфид молибдена), производя образцы по описанной технологии “порошковой металлургии”. Далее приведены результаты сравнительного исследования механических свойств (пп. 1—5 табл. 1) по оригинальной методике 19 наполненных КМ, допускающих массовое производство и имеющих приемлемую себестоимость. Трибологические характеристики выбранных перспективных КМ будут в дальнейшем исследованы по методике [10] на установке [11] наряду с более представительными испытаниями их механических свойств.

2. Технология изготовления образцов

Цилиндрические образцы-таблетки КМ изготавливали по технологии, включающей а) дозирование порошков ПТФЭ и наполнителей, их перемешивание в лопастной мешалке, б) прессование приготовленной массы

Табл. 2

Программа прессования образцов

Программа блока нагружения с разгрузкой и выдержками		Номер блока	Порядок нагружения
Этап	Скорость траверсы		
1	0,05 мм/с до максимального напряжения σ_M	1	Блок нагружения с $\sigma_M = 5$ МПа
2	0 мм/с 30 с	2	Блок нагружения с $\sigma_M = 10$ МПа
3	-0,05 мм/с до 0,04 МПа	3	Блок нагружения с $\sigma_M = 20$ МПа
4	0 мм/с 30 с	4	Блок нагружения с $\sigma_M = 30$ МПа
		5	Блок нагружения с $\sigma_M = 40$ МПа
		6	Блок нагружения с $\sigma_M = 40$ МПа
		7	Блок нагружения с $\sigma_M = 40$ МПа

Программа спекания образцов

Этап	$T, ^\circ\text{C}$	Продолжительность, мин
1	20—340	180
2	340—370	40
3	370—370	120
4	370—300	120
5	300—20	С сушильным шкафом

смеси в пресс-форме по программе табл. 2 с последующей выдержкой в свободном состоянии не менее часа, в) свободное спекание в печи по программе табл. 3. Прессование осуществлялось на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A, в качестве пресс-формы использован стальной полый толстостенный цилиндр с двумя стальными поршнями-пуансонами с полированными контактными поверхностями. Программа прессования с циклическими нагрузками и разгрузками обеспечивала минимальную пористость материала и однородное распределение плотности материала по образцу. Спекание осуществлялось в сушильном шкафу ШСП-0,5-450 на одном уровне. Программа спекания (табл. 3) обеспечивала плотность образцов ПТФЭ $2,18 \text{ г/см}^3$, соответствующую степени кристалличности 60%, оптимальной для применения в качестве антифрикционного материала [13]. Образцы-таблетки, имевшие после прессования диаметр 20,06 мм и высоту ~ 8 мм, после спекания сокращались в диаметре на 1,3—3,2% и увеличивались по толщине на 1,6—8,0% в зависимости от состава композита и дисперсности наполнителей. Небольшая вогнутость/выпуклость торцевых плоскостей после спекания образцов (вследствие технологической памяти материала о процессе одноосного прессования с трением по боковой поверхности) устранялась шлифованием на водостойкой наждачной бумаге Р240. Были выполнены измерения размеров каждого из полученных образцов, необходимые для последующих испытаний на свободное и стесненное сжатие.

Согласно описанной технологии было изготовлено по шесть образцов-таблеток для 19 видов КМ, массовый состав которых приведен в табл. 4. В качестве основы для материала сравнения КМ1 взят ПТФЭ марки ПН-40, позволяющий получить образец с минимальной пористостью. Материалы КМ2—КМ4 с коксом, углеволокном и коллоидным графитом С-1 изготовлены из смесей производства ООО “Пермский завод фторопластовых изделий”. Составы КМ5—КМ7 — с коллоидным графитом С-1, КМ8 — с измельченным и просеянным пухом терморасширенного графита, КМ9 — с измельченными отходами производства графитового листового материала — экспериментальные. В материалах КМ10—КМ19 в качестве наполнителя, отвечающего за жесткость и износостойкость,

Состав изготовленных образцов наполненных фторкомпозитов

Код	Наполнение, мас. ч.	Марка [11]
Основа — ПТФЭ марки ПН-40		
КМ1*	-	Ф4
Композиты ПТФЭ с коксом, углеволокном, коллоидным и терморасширенным графитами		
КМ2**	20% кокса	Ф4К20
КМ3***	15% кокса, 5% углеволокна	Ф4К15УВ5
КМ4 ^{4*}	15% кокса, 5% коллоидного графита	Ф4К15Г5
КМ5 ^{4*}	20% коллоидного графита	Ф4Г20
КМ6 ^{4*}	15% коллоидного графита	Ф4Г15
КМ7 ^{4*}	25% коллоидного графита	Ф4Г25
КМ8 ^{5*}	20% терморасширенного графита	Ф4ТРГ20
КМ9 ^{5*}	20% отходов терморасширенного графита	Ф4ТРГ20
Композиты ПТФЭ с бронзой, коллоидным графитом и дисульфидом молибдена		
КМ10	40% дендритной бронзы ^{6*} , 2% дисульфида молибдена ^{7*}	Ф4Бр40М2
КМ11	30% дендритной бронзы, 2% дисульфида молибдена	Ф4Бр30М2
КМ12	50% дендритной бронзы, 2% дисульфида молибдена	Ф4Бр50М2
КМ13	40% дендритной бронзы, 5% коллоидного графита	Ф4Бр40Г5
КМ14	30% дендритной бронзы, 5% коллоидного графита	Ф4Бр30Г5
КМ15	50% дендритной бронзы, 5% коллоидного графита	Ф4Бр50Г5
КМ16	40% бронзы ^{8*} 0—160 мкм, 5% коллоидного графита сульфида молибдена	Ф4Бр40Г5
КМ17	40% бронзы 0—160 мкм, 2% дисульфида молибдена	Ф4Бр40М2
КМ18	40% бронзы 20—40 мкм, 2% дисульфида молибдена	Ф4Бр40М2
КМ19	40% бронзы 40—80 мкм, 2% дисульфида молибдена	Ф4Бр40М2

*ГалоПолимер, Россия, ТУ 2213-021-13693708-2005 (средний размер частиц 21—45 мкм).

**TIMREX® PC 40-OC, IMERYS Graphite & Carbon, Швейцария (размер 50% частиц менее 14 мкм, 90% — менее 42 мкм).

***Углеволокно измельченное, диаметр 7 мкм, средняя длина 100 мкм.

^{4*}Завальевский графит, Россия, ТУ 113-08-48-63-90 (размер частиц менее 63 мкм).

^{5*}Силур, Россия (размер частиц менее 63 мкм).

^{6*}Rogal Bronze GS 0/40-03, Carl Schlenk, Германия (дендритная, размер частиц менее 40 мкм).

^{7*}BSM10/J, Trigon Chemie, Германия (размер 50% частиц менее 10 мкм).

^{8*}Полема, Россия, ПРВ-Бр05Ц5С5, ТУ 14-22-51-91 (размер частиц 20—40, 40—80 и 0—160 мкм).

использована бронза разного фракционного состава, а в качестве сухих смазок — дисульфид молибдена и коллоидный графит С-1.

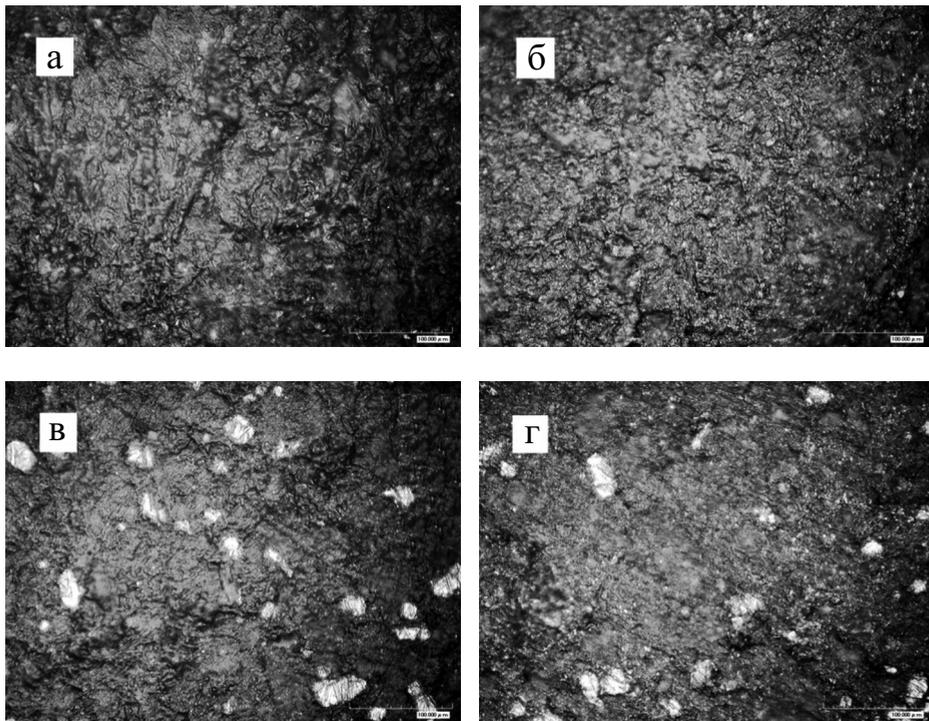


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов KM2 (а), KM7 (б), KM12 (в), KM15 (г) с увеличением 700×.

Контроль однородности распределения наполнителей по образцу осуществляли в ходе исследования его торцевых плоскостей с помощью цифрового оптического микроскопа Nipox KH-7700 с 700-кратным объективом. На рис. 1 представлены фото поверхности образцов композитов KM2, KM7, KM12 и KM15.

3. Испытание на вдавливание стального шарика

Надежная первичная характеристика жесткости наполненных фторком-позитов может быть определена по вдавливанию стального шарика диаметром 5 мм согласно ГОСТ 4670-2015 [35]. Испытание реализовано на базе универсальной испытательной машины Zwick Z100/SN5A с датчиком силы 1 кН и длинноходовым датчиком продольной деформации Multisens (рис. 2). Задавали программу нагружения до максимальной силы с разгрузкой и выдержкой (табл. 5) согласно данному стандарту. Твердость по Бринеллю (МПа) рассчитывали по формуле

$$HB_5 = F_{\max} / S,$$

где $F_{\max} = 132$ Н — сила; S — площадь контакта (мм^2), определяемая по максимальной глубине внедрения согласно [35]. Для каждого из ма-



Рис. 2. Приспособление для вдавливания шарика в сборе с образцом КМ1, датчиком силы и установленными щупами экстензометра.

териалов выполняли 10 независимых испытаний — по пять на плоских торцах двух образцов-таблеток, с соблюдением требования ГОСТ для малых образцов по расстоянию между отпечатками и краем образца не менее 5 мм.

Результаты испытаний в виде диаграмм нагружения (рис. 3) в для материала КМ1 дают представление не только о твердости (жесткости) материала, но и о природе его деформации. Изменения глубины внедрения шарика d во время выдержки при максимальной и минимальной нагрузках характеризуют меру деформации ползучести материала, аналогичная величина в течение разгрузки — меру упругой деформации, а остаточная глубина вдавливания — меру вязкопластической деформации. При известных оговорках, связанных с неоднородностью напряженно-деформированного состояния индентлируемого образца, количественное сравнение материалов можно выполнить по приращениям глубины внедрения шарика во время разгрузки $\delta_e = d_2 - d_3$ и восстановления при минимальной нагрузке $\delta_{ve} = d_3 - d_4$, а также остаточной глубине отпечатка $\delta_p = d_4$ (d_k ($k = 1, 2, 3, 4$) — глубина вдавливания, соответствующая окончанию этапа k программы испытаний согласно данным табл. 5, $\delta_p + \delta_{ve} + \delta_e = d_2$ — максимальная глубина внедрения).

Табл. 5

Программа испытания на вдавливание шарика

Этап	Скорость траверсы, мм/с	Условие задания
1	0,0833	До силы $F_{\max} = 132$ Н
2	0	Выдержка 30 с
3	-0,0833	До силы 9,8 Н
4	0	Выдержка 30 с

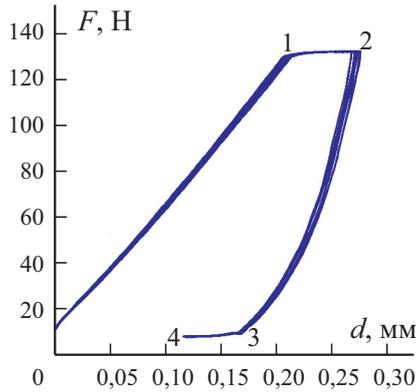


Рис. 3. Диаграммы нагрузка—глубина вдавливания $F-d$ шарика для образцов КМ1 с характерными точками 1—4 окончания соответствующих этапов испытания согласно данным табл. 5.

Результаты сравнения твердости по Бринеллю исследуемых КМ (рис. 4) показывают, что добавление измельченного терморасширенного графита или его отходов (композиты КМ9, КМ9) практически не увеличивает твердость материала по сравнению с ПТФЭ. Коллоидный графит как наполнитель, увеличивающий твердость (КМ5-7), проявляет себя не хуже кокса или бронзы. Составы с 40% бронзы показывают сходные характеристики независимо от размеров, дисперсного состава и морфологии поверхности частиц. Лучшими оказываются материалы КМ15 и КМ12 с 50% мелкодисперсной дендритной бронзы и 5% коллоидного графита или 2% дисульфида молибдена соответственно, а также КМ3 с углеродом.

Твердость, обратно пропорциональная (в первом приближении) глубине вдавливания шарика, позволяет сравнить материалы по величинам полной деформации. Данные рис. 5 иллюстрируют составляющие с разной реологией в этой деформации. Максимальной остаточной дефор-

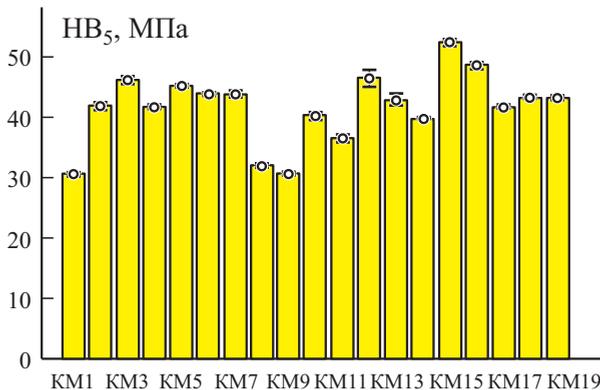


Рис. 4. Значения твердости по Бринеллю HB_5 материалов с доверительными интервалами с вероятностью 0,95.

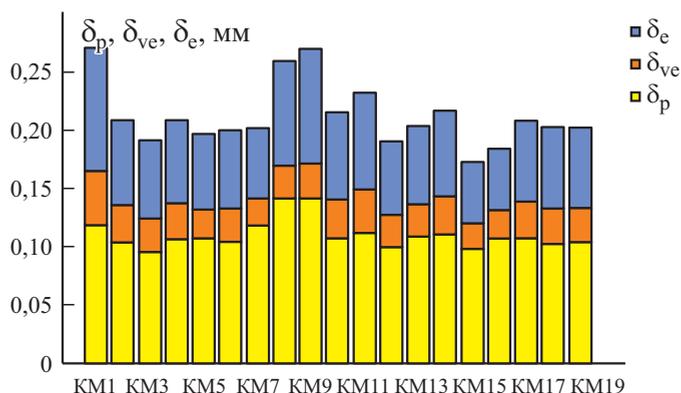


Рис. 5. Глубина внедрения шарика и ее составляющие с разной реологией.

мацией (выше, чем ПТФЭ) обладают композиты с терморасширенным графитом, минимальной — композиты KM3 с углеволокном, KM12 и KM15 с 50% мелкодисперсной дендритной бронзы с 2% дисульфида молибдена либо 5% коллоидного графита соответственно, а также KM16 с 40% крупнозернистой бронзы и 5% коллоидного графита. По совокупности максимальных и остаточных деформаций от перечисленных не отстают композиты KM5-7 с 15—25% коллоидного графита в качестве единственного наполнителя.

4. Испытание на свободное сжатие

Одно из двух базовых испытаний на свободное сжатие выполняли на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A с датчиком силы 100 кН, датчиком продольной деформации Multisens в условиях минимального трения по торцам для реализации одноосного напряженного

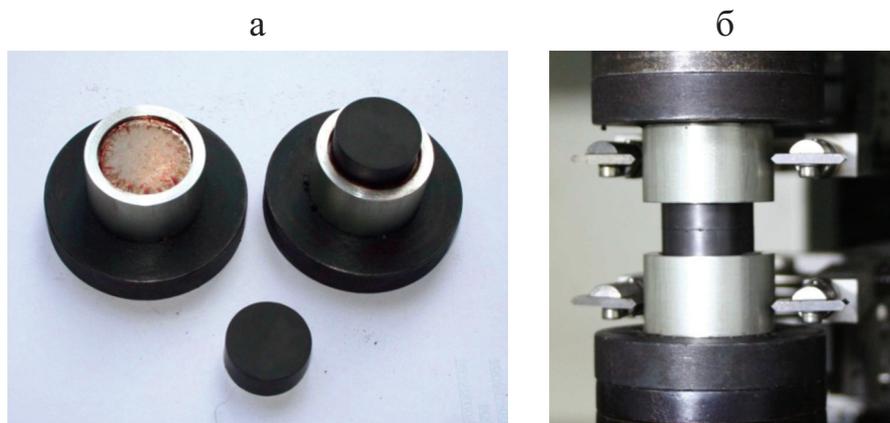


Рис. 6. Детали приспособления, образцы и приспособление в сборе с образцами и установленными щупами экстензометра.

Программа испытания на свободное сжатие

Этап	Скорость траверсы, мм/с	Условие задания
1	0,05	До деформации 10%
2	0	Выдержка 1000 с
3	-0,05	До напряжения 0,1 МПа
4	0	Выдержка 300 с

состояния в составном коротком цилиндрическом образце. Специально изготовленное приспособление (рис. 6) имеет две стальные цилиндрические самоцентрирующиеся опоры со шлифованными контактными плоскостями и дюралевые профилированные втулки с ограничивающим буртиком, предотвращающим “выстреливание” сжатого образца, но позволяющим торцевым зонам образца свободно расширяться в поперечном направлении до достижения 10% осевой деформации сжатия. Процедура установки образца: контактные поверхности опор смазывают низковязкой консистентной смазкой, на них укладывают две смазанные пленки ПТФЭ толщиной 50 мкм, затем устанавливают половинку составного образца, собирают вторую опору, устанавливаемую одновременно с образцом-половинкой на другую часть образца в нижней опоре.

Программу нагружения до максимальной деформации сжатия 10% с разгрузкой и выдержками (табл. 6) выполняли индивидуально для каждого составного образца с измеренной высотой заданием смещения опор по экстензометру. При организации испытания принимали во внимание рекомендации стандарта [36]. По данным эксперимента (рис. 7) определяли: а) модуль Юнга E при заданной скорости деформации по координатам двух точек на линейном участке кривой деформирования в диапазоне напряжений (2—6) МПа, б) напряжение при деформации 1, 5 и 10%, характеризующей нелинейность диаграммы деформирования. По этим же

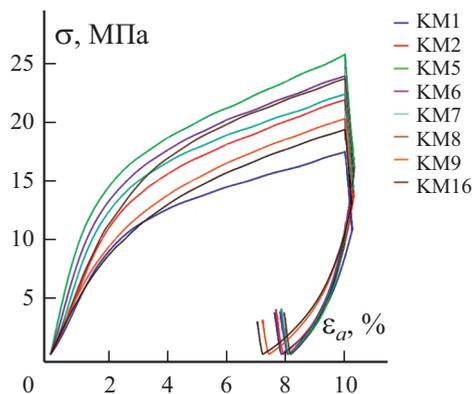


Рис. 7. Диаграммы деформирования образцов при свободном сжатии.

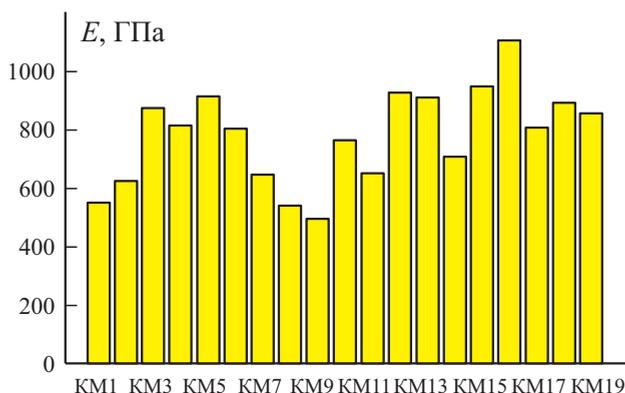


Рис. 8. Модуль Юнга образцов, испытание на свободное сжатие.

данным могут быть определены релаксация напряжения во время выдержки при максимальной деформации (этап 2 программы испытаний), возврат деформации на участке разгрузки (этап 3) и восстановление напряжений в течение этапа 4, позволяющие сравнить реологию материалов и идентифицировать подходящие модели.

На рис. 8 и 9 приведены данные при свободном сжатии: модуль Юнга E (при заданной скорости деформации) и напряжения $\sigma_1, \sigma_5, \sigma_{10}$ при деформациях 1, 5 и 10%, характеризующие нелинейность кривой деформирования. Эти характеристики растут с массовой долей содержания наполнителей, минимальные значения имеют ПТФЭ и композиты с терморасширенным графитом. Наибольшие значения (по совокупности характеристик) имеют материалы KM3 с углеродом, а также KM15 с 50% мелкозернистой дендритной бронзы и KM16 с 40% крупнозернистой бронзы в качестве основного наполнителя. Как и по твердости, составы KM5-7 с 15—25% коллоидного графита в качестве единственного наполнителя демонстрируют характеристики выше средних, а составы с 40%

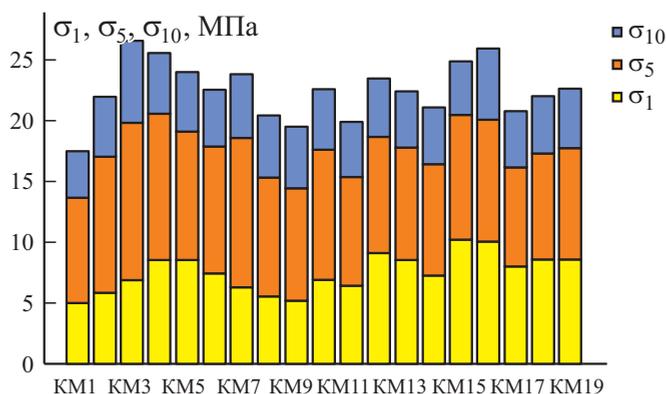


Рис. 9. Напряжение при деформации образцов 1, 5 и 10%, испытание на свободное сжатие.

бронзы КМ10,13, 16—19 показали сходные характеристики независимо от размеров, дисперсного состава и морфологии поверхности частиц.

5. Испытание на стесненное сжатие

Второе базовое испытание — на стесненное сжатие — также выполняли на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A с датчиком силы 100 кН и датчиком продольной деформации Multisens с помощью самодельного приспособления (рис. 10). Программа нагружения до максимального напряжения 160 МПа с разгрузкой и выдержками (табл. 7) задавала три цикла, в течение которых стабилизируется диаграмма. Методика испытаний и обработки данных подробно изложена в [9].

Прессование образцов-таблеток из порошковых композиций выполняли с помощью этого же приспособления, но без смазки контактных поверхностей. Поскольку диаметр таблеток после спекания уменьшался, для устранения зазора в испытательной ячейке и начального участка нагружения с переходным видом напряженно-деформированного состояния от свободного к стесненному сжатию составные образцы из двух таблеток предварительно подпрессовывались. Испытывали как “свежие” образцы, так и образцы после испытаний на свободное сжатие после двух суток выдержки. Предварительное нагружение свежих образцов выполняли давлением 30 МПа с 10-минутной выдержкой, последующей разгрузкой и 5-минутной выдержкой, затем задавали начальную нагрузку 10 МПа с её удержанием до окончания заметной релаксации. При испытаниях образцов после их свободного сжатия (в случае малого остаточного увеличения диаметра до 20,06 мм) подпрессовывание выполняли давлением 10 МПа с его удержанием до окончания заметной релаксации. Для каждого образца из условия постоянства объёма проводили пересчет суммарной высоты

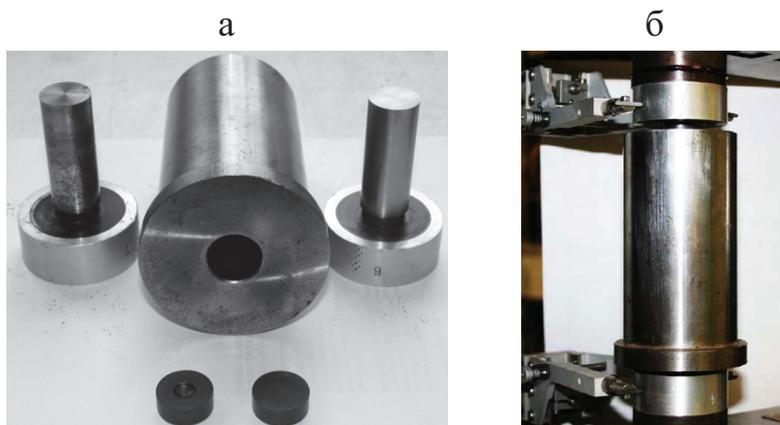


Рис. 10. Детали приспособления, образцы и приспособление в сборке с образцами и установленными щупами экстензомера.

Программа испытания на стесненное сжатие

Программа блока нагружения с разгрузкой и выдержками			Номер блока	Порядок нагружения
Этап	Скорость траверсы, мм/с	Условие задания		
1	0.0833	До напряжения 160 МПа	1	Блок нагружения
2	0	Выдержка 300 с	2	Блок нагружения
3	-0.0833	До напряжения 0.3 МПа	3	Блок нагружения
4	0	Выдержка 300 с		

обеих таблеток, необходимой для расчета осевой деформации по показаниям экстензометра.

Кроме испытаний сплошных образцов-таблеток реализованы испытания таблеток с односторонней лункой в форме сферического сегмента с радиусом 5 мм, диаметром основания 8 мм и глубиной 2 мм, пустой или заполненной смазкой ЦИАТИМ-221Ф. Эти испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации опор [1], необходимы для исключения материалов, не способных к удержанию формы лунок со смазкой при расчетных и пиковых значениях контактных давлений. Каждую характеристику определяли по испытанию одного составного образца из двух таблеток (с лунками, обращенными к сжимающим пуансонам).

Диаграммы деформирования восьми видов композитов по представленной программе испытания приведены на рис. 11. Горизонтальный сдвиг петель гистерезиса, характеризующий остаточную объемную деформацию, зависит как от самого материала, так и от предварительного подпрессовывания образцов. Правильно выбранный допуск на толщину антифрикционного слоя в зависимости от выбранного материала способен обеспечить его расчетную толщину в изделии в условиях эксплуатации. Поэтому

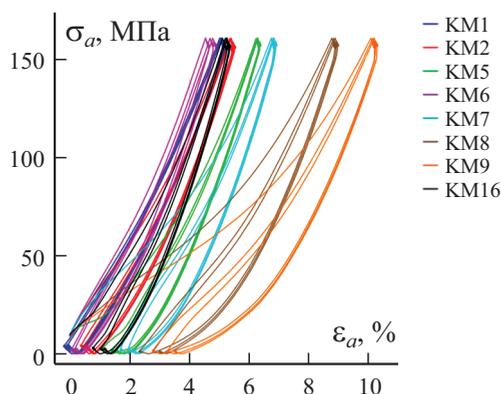


Рис. 11. Диаграммы осевого деформирования образцов при стесненном сжатии.

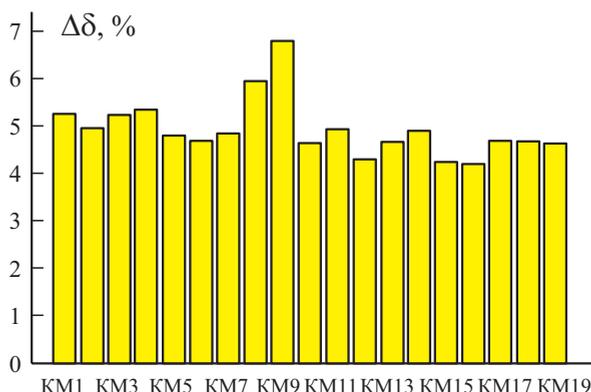


Рис. 12. Размах деформаций образцов на третьем цикле испытания на стесненное сжатие.

эта характеристика остаточной пористости материала не включена в требования (см. табл. 1). Однако размах деформации $\Delta\epsilon$ в установившемся цикле стесненного сжатия до 160 МПа (рис. 12) для проектировщиков является важной характеристикой материала, определяющей границы изменения расстояния между жесткими частями опоры в процессе эксплуатации. Требованиям 6 (см. табл. 1) не удовлетворяют ПТФЭ (KM1), композиты с терморасширенным графитом KM8, KM9 и KM3, KM4 с 15% кокса или углеволокна, а наилучшие показатели обнаруживают KM12 и KM15 с 50% дендритной бронзы и KM16 с 40% крупнозернистой бронзы и 5% коллоидного графита.

На рис. 13 приведены модули жесткости h_{50}, h_{100}, h_{150} при напряжении 50, 100 и 150 МПа в условиях стесненного сжатия. Величина h_{σ} монотонно возрастает с ростом напряжения σ . Значения данных характеристик также увеличиваются с массовой долей содержания наполнителей. Минимальные значения демонстрируют композиты с терморасширенным гра-

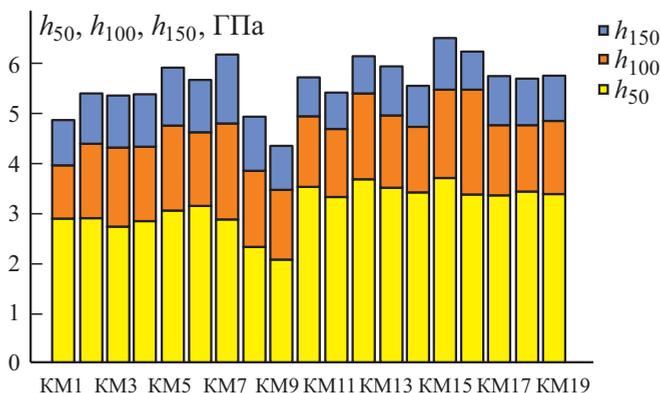


Рис. 13. Модуль жесткости сплошных образцов при стесненном сжатии.

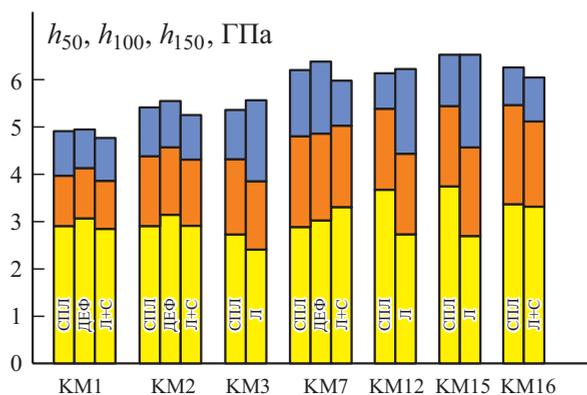


Рис. 14. Сравнение модулей жесткости образцов (сплошных и с лункой, пустой и со смазкой) при стесненном сжатии.

фитом KM8, KM9. Наивысшие значения (по совокупности характеристик) имеют материалы KM15, KM16 с 50% мелкозернистой дендритной или 40% крупнозернистой бронзы в качестве основного наполнителя и 5% коллоидного графита, а также KM7 с 25% коллоидного графита в качестве единственного наполнителя.

На рис. 14 проведено сравнение жесткостей исходного и предварительно деформированного сплошного материала, а также образцов с пустой и заполненной смазкой лунками для наполненных КМ. Все предварительно деформированные материалы оказались жестче исходных. Образцы с пустыми лунками достигают жесткости сплошного материала по мере исчезновения лунки при пиковых нагрузках (последняя при разгрузке восстанавливается, но не в полной мере). Жесткость образцов с лунками, заполненными смазкой, при напряжении до 50 и 100 МПа практически та же, что и жесткость сплошного материала, при 150 МПа — несколько ниже ее.

Заключение

Выполненное исследование, методика которого включает стандартные и предлагаемые испытания, обеспечивает исчерпывающими данными о механических характеристиках (твердости, модуле Юнга и напряжении до 10% деформации при свободном сжатии, жесткости и размахе деформации образцов с лунками и без них при стесненном сжатии в диапазоне до 150 МПа) наполненных композитов на основе ПТФЭ. Наряду с трибологическими характеристиками они необходимы при выборе антифрикционного полимерного материала для тонких плоских и сферических слоев шаровых опор. Показано, что наименее трудоемкое из выполненных и статистически значимое испытание по определению твердости по Бринеллю даёт возможность выполнять экспресс-сравнение АПМ для

исключения не удовлетворяющих требованиям по механическим характеристикам. Испытания на свободное и стесненное сжатие дают сопоставимую картину с данными по твердости. С точки зрения механических характеристик признаны несостоятельными композиты с измельченным терморасширенным графитом. Лучшими характеристиками обладают композиты, наполненные 50% мелкозернистой дендритной или 40% крупнозернистой бронзы в качестве основного наполнителя и 5% коллоидного графита. Выше средних оказались характеристики композитов с 20—25% коллоидного графита в качестве единственного наполнителя. Добавление 5% коллоидного графита в составы с 40 и 50% дендритной или крупнозернистой бронзы заметнее увеличивают все механические характеристики, чем добавление в них 2% дисульфида молибдена. Композит с 20% коллоидного графита также имеет все механические характеристики лучше композита, наполненного 20% кокса. Составы с 40% бронзы показали сходные характеристики независимо от размеров, дисперсного состава и морфологии поверхности частиц.

Требованиям по механическим характеристикам для применения в качестве материала антифрикционного слоя в опорных частях с шаровым сегментом (см. табл. 1) удовлетворяют: согласно п.1 — массово производимые композиты КМ2—КМ4, материалы с коллоидным графитом КМ5—КМ7 и бронзой КМ12, КМ13, КМ15—КМ19, согласно п.2 — КМ3—КМ5, КМ12, КМ13, КМ15—КМ19, согласно п.3, 4 — КМ3, КМ5, КМ7, КМ12, КМ15, КМ16, согласно п.5 — все материалы, кроме КМ1, КМ8 и КМ9, согласно п.6 — все материалы, кроме КМ1, КМ3, КМ4, КМ8 и КМ9. Лучшую совокупность механических характеристик обнаруживают композиты КМ5, КМ7, КМ12, КМ15, КМ16.

Представленная методика изучения механических свойств может быть использована при исследованиях более широкого класса КМ, наполненных порошками твердых пластиков или наноразмерных частиц для сравнения и оценки применимости в узлах с высоким контактным давлением и возвратно-поступательным характером относительного скольжения и сдвига. На основе данных, полученных из базовых экспериментов на свободное и стесненное сжатие, возможен выбор подходящей нелинейной модели упруговязкопластичности сжимаемых изотропных полимеров (например, из числа приведенных в [37]). Идентификация выбранной модели для композитов, показавших наилучшие механические и трибологические характеристики, должна опираться на более представительную программу испытаний по изложенной методике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Azizinamini A., Power E. H., Myers G. F., Celik Ozyildirim H.* Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Innovative Systems, Subsystems and Components. — Washington: The National Academies Press, 2014. — 248 p.
2. Пат. RU 146859 U1. Опорная часть моста / *Буканов В. В., Ипанов А. С., Хатинов С. А., Адамов А. А., Остреп С. Г.* — Заявлено 24.04.2014 // 2014. — Бюл. № 29.
3. Технические требования на опорные части с шаровым сегментом и антифрикционным покрытием / Введены распоряжением ОАО «РЖД» № 2755р от 12.12.2013 г. — 33 с. URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/docs/2013/dekabr-2013/5040-rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-12-12-2013-n-2755r.htm> (дата обращения: 06.12.2021)
4. EAD 050009-00-0301 Spherical and cylindrical bearing with special sliding material made of UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene) / EOTA. 2018. — 28 p. URL: https://www.eota.eu/download?file=/2014/14-05-0004/ead%20for%20jeu/ead%20050004-00-0301_jeu2018.pdf (дата обращения: 06.12.2021)
5. EAD 050009-00-0301 Spherical and cylindrical bearing with special sliding material made of fluoropolymer / EOTA. 2017. — 30 p. URL: https://www.eota.eu/download?file=/2015/15-05-0009/ead%20for%20jeu/ead%20050009-00-0301_jeu2017.pdf (дата обращения: 06.12.2021)
6. *Campbell T. I., Kong W. L., Manning D. G.* Laboratory investigation of the coefficient of friction in the polytetrafluoroethylene slide surface of a bridge bearing // Transportation Research Record, 1275. — 1987. — P. 45—52.
7. *Stanton J. F., Roeder C. W., Campbell T. I.* Appendix C: Friction and wear of PTFE sliding surfaces / In NCHRP Report 432: High-Load Multi-Rotational Bridge Bearings. — TRB, National Research Council, Washington, D.C. — 1999. — 413 p.
8. *Bocklenberg L., Winkler K., Mark P., Rybarz S.* Low friction sliding planes of greased PTFE for high contact pressures // Open J. Civil Eng. — 2016. — Vol. 6. — P. 105—116.
9. *Адамов А. А.* Экспериментальное обеспечение и идентификация модели изотропного тела с упругой объёмной сжимаемостью дисперсно-наполненных композитов на основе фторопласта и сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Конструкции из композиц. материалов. — 2013. — № 2. — С. 28—37.
10. *Адамов А. А.* Экспериментальное изучение механического поведения и трения полимерных антифрикционных материалов при давлениях до 60 МПа // Сб. докл. XI Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теорет. и прикл. механики, Казань, 20-24 августа 2015 г. — С. 79—81.
11. Пат. RU 2692130 С2. Испытательная установка реверсивного трения / *Ипанов А. С., Адамов А. А., Светлаков А. В., Василенко В. Д., Патраков И. М., Непени И. В.* — Заявлено 24.10.2017 // 2019. — Бюл. № 18.
12. *Истомин Н. П., Семенов А. П.* Антифрикционные свойства композитных материалов на основе фторполимеров. — М.: Наука, 1981. — 146 с.
13. *Пугачев А. К., Росляков О. А.* Переработка фторопластов в изделия. — Л.: Химия, 1987. — 168 с.
14. *Остреп С. Г.* Фторполимеры в химической промышленности. — Пермь, 2019. — 400 с.
15. *Bhushan B., Wilcoc D. F.* Wear behavior of polymer compositions in dry reciprocating sliding // Wear. — 1982. — Vol. 75. — P. 41—70.
16. *Bahadur S., Tabor D.* The wear of filled polytetrafluoroethylene // Wear. — 1984. — Vol. 98. — P. 1—13.
17. *Plitmanis J., Cirule K. I., Kregers A. F., Terauds A. E., Tolks A. M.* Optimization of the composition and tribological properties of high-density polyethylene-calcite-silicon

nitride composites by the method of experiment planning // *Mech. Compos. Mater.* — 1996. — Vol. 32, No.5. — P. 483—486.

18. Композитные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / [Ю. К. Машков и др.]. — М.: Машиностроение, 2005. — 240 с.

19. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин [и др.]; отв. ред. А. В. Герасимов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. — 311 с.

20. *Schmitz T. L., Action J. E., Burris D. L., Ziegert J. C., Sawyer W. G.* Wear-rate uncertainty analysis // *Transactions of the ASME. Journal of Tribology.* — 2004. — Vol. 126. — P. 802—808.

21. *Burriss D. L., Sawyer W. G.* A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite // *Wear.* — 2006. — Vol. 261. — P. 410—418.

22. *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. — Vol. 254. — P. 573—580.

23. *Xu W., Gao H., Gao L.-L., Chen X., Wang Y.* Tensile ratcheting behaviors of bronze powder filled polytetrafluoroethylene // *Front. Chem. Sci. Eng.* — 2013. — Vol. 7. — P. 103—109.

24. *Kolhe S., Deshpande A., Wangikar K.* Wear behavior of polytetrafluoroethylene composites: A review // *Kolhe M., Labhasetwar P., Suryawanshi H.* (eds) *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering.* — Springer, Singapore. — 2019. — P. 571—584.

25. *Stan F., Fetecau C.* Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation // *Composites.* — 2013. — Vol. B47. — P. 298—307.

26. *Cheng H., Cheng X.* Mechanical and tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites reinforced by carbon nanotubes and poly-P-oxybenzoate // *High Performance Polym.* — 2013. — Vol. 25. — P. 611—621.

27. *Tóth L. F., De Baets P., Szébényi G.* Thermal, viscoelastic, mechanical and wear behaviour of nanoparticle filled polytetrafluoroethylene: A comparison // *Polymers.* — 2020. — Vol. 12, No. 9. — 1940.

28. *Okhlopkova A. A., Shits E. Y.* Structure and properties of Teflon composites with natural diamond powders // *Mech. Compos. Mater.* — 2004. — Vol. 40, No. 2. — P. 145—150.

29. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Слепцова С. А. Полимерные композитные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена // *Рос. хим. журн.* — 2008. — Т. 52, № 3. — С. 147—152.

30. Охлопкова А. А., Слепцова С. А., Парникова А. Г., Ульянова Т. М., Калмычкова О. Ю. Триботехнические и физико-механические свойства нанокompозитов на основе ПТФЭ и оксида алюминия // *Трение и износ.* — 2008. — Т. 29, № 6. — С. 635—639.

31. *Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopkova A. A., Cho J. H., Grakovich P. N., Shim E. L.* Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers // *Molecules.* — 2019. — Vol. 24, No. 2.

32. *Shelestova V. A., Serafimovich V. V., Grakovich P. N.* The effect of the size of carbon fibers on the physico-mechanical properties of fulvic composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2002. — Vol. 38, No.2. — P. 125—130.

33. Кропотин О. В., Машков Ю. К., Кургузова О. А. Создание полимерного антифрикционного нанокompозита на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью // *Омский науч. вестн.* — 2013. — № 2 (120). — С. 86—90.

34. Конова Е. М., Острер С. Г., Хатинов С. А. Влияние природы наполнителя на физико-механические свойства радиационных модификаций композитов на основе политетрафторэтилена // Пласт. массы. — 2011. — № 5. — С. 40—43.

35. ГОСТ 4670-2015 (ISO 2039-1:2001). Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика. — М.: Стандартиформ, 2016. — 10 с.

36. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие. — М.: Стандартиформ, 2014. — 19 с.

37. Гольдман А. Я. Объемная деформация пластмасс. — Л.: Машиностроение, 1984. — 232 с.

Поступила в редакцию 04.08.2021

Окончательный вариант поступил 22.11.2021

Received Aug. 4, 2021 (Nov. 22, 2021)
