

Научная статья

УДК 621.893

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176841>

ИЗНОСОСТОЙКИЕ И АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПО ЛАВОЧКИНА»

Вячеслав Алексеевич Богачев¹, Николай Александрович Маркачев²,

Юрий Александрович Петров³, Михаил Николаевич Рошин⁴,

Даниил Владимирович Сергеев⁵✉, Александр Олегович Штокал⁶

^{1,2,3,5,6}Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», Химки, Московская область, Россия

⁴Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

⁵sergeevdv@laspace.ru✉

Аннотация. В статье осуществлён обзор основных антифрикционных материалов и покрытий, применяемых в узлах трения элементов конструкций космических аппаратов производства АО «НПО Лавочкина». Показаны особенности применения пластичных смазок, твёрдосмазочных покрытий и самосмазывающихся антифрикционных материалов. Предложены новые перспективные самосмазывающиеся антифрикционные материалы для работы в условиях открытого космоса и (или) атмосферы Венеры.

Ключевые слова: трение; износ; твёрдосмазочные покрытия; смазки; антифрикционные материалы

Для цитирования: Богачев В.А., Маркачев Н.А., Петров Ю.А., Рощин М.Н., Сергеев Д.В., Штокал А.О. Износостойкие и антифрикционные материалы и покрытия, применяемые в узлах трения элементов конструкций космических аппаратов производства АО «НПО Лавочкина // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176841>

Original article

WEAR-RESISTANT AND ANTIFRICTION MATERIALS AND COATINGS USED IN FRICTION UNITS OF SPACECRAFT STRUCTURAL ELEMENTS MANUFACTURED BY LAVOCHKIN ASSOCIATION

Vyacheslav A. Bogachev¹, Nikolai A. Markachev², Yuri A. Petrov³, Mikhail N. Roshchin⁴✉, Daniil V. Sergeev⁵, Alexander O. Shtokal⁶

^{1,2,3,5,6}Lavochkin Association,

Khimki, Moscow region, Russia

⁴Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵sergeevdv@laspacespace.ru✉

Abstract. Specialized wear-resistant antifriction materials and coatings are applied in space technology in friction nodes, which can work in open space and (or) atmospheric conditions of the planets under study. All antifriction and wear-resistant materials and coatings can be conditionally divided into liquid lubricants (oils), greases (pastes), antifriction solid

lubricants and self-lubricating (antifriction) materials. Greases are soft ointments of dense thick consistency and are intended to reduce the friction force in mechanical assemblies, decrease the rubbing pairs wear, prevent tearing and jamming, and ensure the necessary service life of the friction unit. In the products developed by S.A. Lavochkin NPO, four brands of antifriction lubricants are most often used: TSIATIM-221, VNII NP-220, VNII NP-274, VNII NP-284. They have been widely tested on the Luna, Venus, Mars, Forecast and Cosmos spacecraft series. When the pressure is reduced to 0.1–10 Pa, the lubricants performance is significantly reduced. The solid lubricating coatings application allows successfully solving the problem of friction and wear reduction of open friction units. These coatings represent a mixture of powdered lubricants dispersed in binder (film-forming) polymer materials and diluted with solvents to the required viscosity for spraying them on the friction surface with subsequent heat treatment. The following solid lubricating coatings are employed in the products of NPO Lavochkina JSC: VNII NP-212, VNII NP-213, VNII NP-230, VNII NP-512, EONITE-3, in which the filler is molybdenum disulfide, or a mixture of molybdenum disulfide with graphite. As an alternative to the NP-512 Research Institute, MODENGY-1001 and MODENGY-1002 TSPS have been introduced. A significant limitation on the application of molybdenum disulfide coatings consists in the fact that at temperatures above +400°C, MoS₂ begins oxidizing intensively. When molybdenum disulfide is oxidized, molybdenum trioxide is formed, which lubricating properties change to the abrasive ones, which does not allow them to be employed in the atmospheres of the planets of the Solar System, primarily Venus. In this regard, the task arises of selecting materials (friction pairs) of friction units of spacecraft that descend in the atmosphere, land

and work on the surface of Venus, which can function at temperatures above +450°C, which can be achieved only through the use of self-lubricating antifriction materials. New promising self-lubricating antifriction materials are proposed: carbon-carbon containing composite materials, partially stabilized zirconium, zirconium 702 coated with micro-arc oxidation. As response materials (counter body), it is proposed to consider the most common structural metal materials of spacecraft: 40X13, 30XGSA steels, aluminum alloy AMg6, titanium alloy VT6. Their laboratory testing and tribological tests are required to confirm the feasibility and feasibility of their use for friction units operating in open space and (or) the atmosphere of Venus.

Keywords: friction; wear; hard-lubricating coatings; lubricants; antifriction materials

For citation: Bogachev V.A., Markachev N.A., Petrov Yu.A., Roshchin M.N., Sergeev D.V., Shtokal A.O. Wear-resistant and antifriction materials and coatings used in friction units of spacecraft structural elements manufactured by Lavochkin Association. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176841>

Введение

В процессе освоения космического пространства довольно часто возникают неполадки и аварии космических аппаратов (КА), связанные с нарушением работоспособности узлов трения. Для обеспечения их работоспособности необходимо изучение закономерностей трения и изнашивания материалов непосредственно в открытом космосе [1,2].

В космической технике применяются специализированные износостойкие антифрикционные материалы и покрытия, которые могут работать в условиях открытого космического пространства и (или) условиях атмосфер исследуемых планет. Смазки и антифрикционные материалы применяют для обеспечения нормальной работы внешнего оборудования, приборов, систем жизнеобеспечения КА [3].

Пары трения агрегатов и узлов КА, как правило, работают при температурах от минус 150°С до плюс 500°С, низком давлении воздуха от 0,1 МПа и до глубокого космического вакуума, работают в среде атмосфер планет [4,5].

Все антифрикционные и износостойкие материалы и покрытия с точки зрения физико-химических характеристик и агрегатного состояния условно можно разделить на жидкие смазки (масла), пластичные смазки (пасты), антифрикционные твёрдые смазочные покрытия (ТСП), самосмазывающиеся (антифрикционные) материалы [6-8].

Жидкие смазки и масла редко применяются для узлов трения, работающих в открытом космосе, в связи с высокой испаряемостью, хотя они и могут использоваться в закрытых герметичных механизмах (таких как рулевые машинки).

1. Пластичные смазки

Пластичные смазки представляют собой мягкие мази плотной густой консистенции и предназначены для уменьшения силы трения в механических узлах,

снижения износа трущихся пар, предотвращения задиров и заеданий, и обеспечения необходимого ресурса работы узла трения.

В изделиях, разрабатываемых НПО им. С.А. Лавочкина, наиболее часто используются четыре марки антифрикционных смазок: ЦИАТИМ-221, ВНИИ НП-220, ВНИИ НП-274, ВНИИ НП-284 [8-12]. Данные смазки применяются в узлах трения герметичных механизмов, длительно работающих в космосе, и в негерметичных узлах с ограниченным сроком эксплуатации. Они прошли широкую апробацию на космических аппаратах серий «Луна», «Венера», «Марс», «Прогноз» и «Космос». В таблице 1 приведены условия эксплуатации и область применения смазок.

Таблица 1

Условия и область применения пластичных смазок

марка смазки	особые свойства	условия эксплуатации			применение в узлах трения
		температурный диапазон, °С	радиационная стойкость, рад	вакуум, мм рт. ст.	
ЦИАТИМ-221	водостойкая химически стабильная, инертна по отношению к резинам и полимерным материалам	-60...+150	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-6}$ (до одного месяца)	в приборных подшипниках качения и скольжения, а также, как уплотнительная в парах трения «металл – металл» и «металл – резина»
ВНИИ НП-220	водостойкая, химически стабильная	-60...+150	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-6}$ (до одного месяца)	в тяжело нагруженных подшипниках скольжения одноразового срабатывания
ВНИИ НП-274	водостойкая, химически стабильная	-80...+160	$5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-8}$ (до двенадцати месяцев)	в легко нагруженных подшипниках качения и зубчатых и червячных передачах
ВНИИ НП-284	химически стабильная	-110...+200	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-8}$ (до одного месяца)	в клапанах, эксплуатируемых в агрессивных средах, как уплотнительная; подшипниках качения и скольжения, зубчатых передачах

1.1. Триботехнические испытания смазок

Испытания пластичных смазок проводились с целью определения их триботехнических характеристик и возможности их применения в узлах и механизмах перспективных долгоживущих КА.

Исходя из продолжительности функционирования узлов трения время испытаний смазок выбрано 200 часов, из них 100 часов – при температуре плюс 20°С, 100 часов – при температуре плюс 150°С.

Ресурсные испытания смазок проводили на подшипниковом стенде НМ-761-00 при нагрузке 10 кгс, частоте вращения 2500 об/мин, среда – воздух, продолжительность испытаний – до резкого необратимого увеличения момента трения, или не менее 100 часов. В процессе испытаний определяли момент трения, температуру и время работы. Результаты ресурсных испытаний пластичных смазок представлены в таблице 2.

Основным контрольным параметром годности смазки являлась максимальная удельная масса ЛКВ, выражаемая в г/см². Количественная оценка легкоконденсирующихся веществ (ЛКВ) смазок проводили на установке ВК-12/3.

Начальная скорость газовыделения и величина испаряемости, полученные по результатам испытаний, приведены в таблице 3.

Таблица 2

Результаты ресурсных испытаний пластичных смазок

марка смазки	температура, °С	момент трения, Н·м		время работы, час	примечание
		начальный	установившийся		
ЦИАТИМ-221	20	0,018639	0,00981	100	ресурс не исчерпан
	150	0,014715	0,005886	100	
ВНИИ НП-220	20	0,020601	0,011772	100	ресурс не исчерпан

	150	0,015696	0,006867	100	
ВНИИ НП-274	20	0,016677	0,006867	100	ресурс не исчерпан
	150	0,00981	0,005886	100	
ВНИИ НП-284	20	0,022563	0,00981	100	ресурс не исчерпан
	150	0,007848	0,006867	100	

Таблица 3

Начальная скорость газовой выделения и величина испаряемости пластичных смазок

марка смазки	начальная скорость газовой выделения, г/см ² ·с	максимальная удельная масса, г/см ²	примечание
ЦИАТИМ-221	$1,777 \cdot 10^{-5}$	$1,194 \cdot 10^{-3}$	до двух месяцев
ВНИИ НП-220	$3,187 \cdot 10^{-5}$	$9,687 \cdot 10^{-3}$	до одного месяца
ВНИИ НП-274	$4,430 \cdot 10^{-6}$	$2,783 \cdot 10^{-4}$	до двенадцати месяцев
ВНИИ НП-284	$3,013 \cdot 10^{-6}$	$1,543 \cdot 10^{-2}$	до одного месяца

На основании полученных результатов сравнительных испытаний антифрикционных смазок можно сделать вывод, что наилучшими рабочими характеристиками обладает смазка ВНИИ НП-274. У неё наименьшие моменты трения как при температуре плюс 20°C, так и при плюс 100°C. Она обладает удовлетворительной морозостойкостью и имеет низкий момент трения 0,3 кгс·см при температуре минус 80°C.

2. Твёрдые смазочные покрытия

При снижении давления до 0,1–10 Па работоспособность смазочных материалов существенно меняется. Это обусловлено их испарением, изменением скорости срабатывания в зоне трения, ухудшением теплоотвода.

Применение ТСП позволяет удачно решить проблему уменьшения трения и износа открытых узлов трения. ТСП представляют собой смесь порошкообразных смазочных материалов, диспергированных в связующих (плёнкообразователях)

полимерных материалах и разбавленных растворителями до необходимой вязкости для нанесения их напылением на поверхность трения с последующей термообработкой [13,14].

По своему поведению в условиях эксплуатации ТСП отличаются от других типов смазочных материалов. В начальный период трения наблюдается относительно быстрый износ покрытия, который после периода приработки постепенно уменьшается. Поэтому при разработке узлов трения с повышенным ресурсом работы, применяемые в них ТСП, проходят технологический процесс приработки [15,16].

В изделиях АО «НПО Лавочкина» применяются следующие ТСП: ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-230, ВНИИ НП-512, ЭОНИТ-3, у которых наполнителем служит дисульфид молибдена, или смесь дисульфида молибдена с графитом. Эти ТСП прошли многократную проверку в узлах трения КА в условиях космоса.

На КА «Луна-16» в узлах трения штанги грунтозаборного устройства (ГЗУ) использованы подшипники скольжения, у которых на трущихся поверхностях валов было нанесено ТСП ВНИИ НП-212.

На КА «Луна-17» и «Луна-21» на посадочных платформах в узлах поворота и направляющих откидных трапов применено покрытие ВНИИ НП-230. ТСП ВНИИ НП-230.

КА серии «Космос» имели узлы зачековки панелей солнечных батарей. На открытые трущиеся поверхности этих узлов наносился ТСП ВНИИ НП-230, которое при раскрытии панелей, обеспечивает их надёжную работу.

За время полёта КА серий «Марс» в течение 7,5 месяцев смазочное покрытие ВНИИ НП-213 обеспечило работоспособность узлов подвески корректирующих микродвигателей с ресурсом суммарной работы до одного часа.

На КА «Фобос» в системе разделения на поверхности трения кронштейна из алюминиевого сплава применено ТСП ВНИИ НП-512 холодного отверждения.

На КА серии «Космос» применено ТСП ЭОНИТ-3, используемое в поворотной терморегулирующей заслонке с ресурсом работы до 3000 часов.

ТСП ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-230, ЭОНИТ-3 отверждаются при высоких температурах (более плюс 150°С), их отжиг и отверждение происходит в лабораторных печах, что не позволяет их наносить на крупногабаритные детали ввиду ограниченного объёма печей.

ТСП ВНИИ НП-512 холодного отверждения применяется на поверхностях трения крупногабаритных деталях или как ремонтный вариант. Ресурс этого покрытия невелик, и оно применяется крайне редко.

В качестве альтернативы ВНИИ НП-512 внедрены ТСП MODENGY-1001, MODENGY-1002, отличающиеся удобством нанесения (при помощи аэрозольных баллончиков), более высоким ресурсом работы и более высокими триботехническими характеристиками.

Внешний вид ТСП MODENGY-1001, MODENGY-1002 представлен на рисунке 1 [17].



а

б

Рис. 1. Внешний вид ТСП MODENGY-1001, MODENGY-1002:

а – до нанесения покрытия; б – после нанесения покрытия.

Существенным ограничением по использованию дисульфид молибденовых ТСП является то, что при температурах выше плюс 400°C MoS_2 начинает интенсивно окисляться. При окислении дисульфида молибдена образуется триоксид молибдена, который обладает уже не смазочными, а абразивными свойствами, при этом цвет покрытия меняется с серого на жёлтый (рисунок 2).

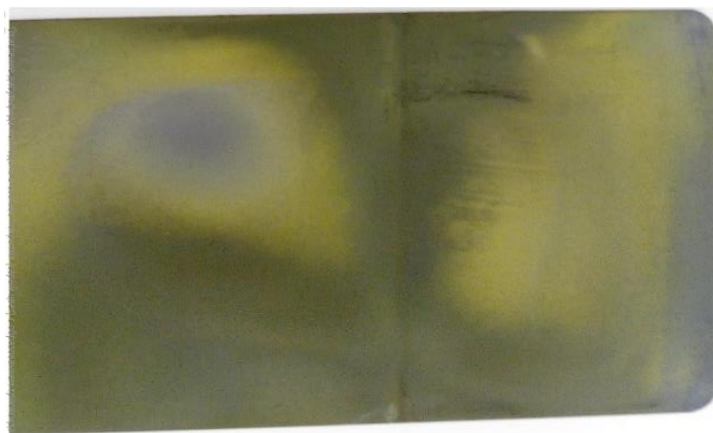


Рис. 2. Образование триоксида молибдена при нагреве ТСП MODENGY-1001 до температуры более плюс 400°C

2.1. Триботехнический эксперимент на орбите Луны

Огромный вклад в развитие и изучение вопросов трения и износа на АО «НПО Лавочкина» внес начальник сектора отдела материаловедения, кандидат технических наук Ярош Владимир Митрофанович. При его непосредственном участии и под его руководством были созданы ряд оригинальных конструкций испытательных установок и имитаторов, проведены исследования новых и перспективных антифрикционных материалов.

В частности, для подтверждения достоверности результатов наземных триботехнических испытаний на АО «НПО Лавочкина» был создан имитатор трения (ИТ), предназначенный для исследования характеристик смазочных материалов как в наземных условиях, газовых средах, так и на борту космических аппаратов. На рисунках 3 и 4 представлены внешний вид и кинематические схемы испытываемых узлов трения.

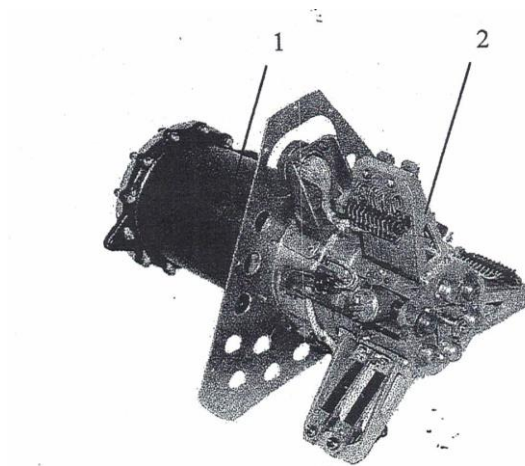


Рис. 3. Внешний вид ИТ:

1 – электромеханический привод; 2 – блок испытательных узлов трения.

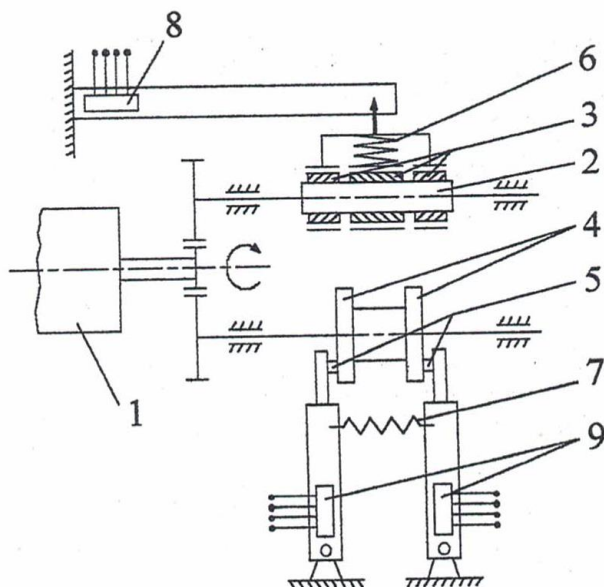


Рис. 4. Кинематические схемы испытываемых узлов трения

1 – электромеханический привод; 2, 3 – вал-втулка; 4, 5 – диск-индентер; 6, 7 – нагрузочные пружины; 8, 9 – тензометрические балки.

В испытываемых узлах трения ИТ было нанесено ТСП ВНИИ НП-212 на основе дисульфида молибдена. Для узла вал-втулка покрытие наносилось на вал, а для пары диск-индентер- на поверхность диска.

Лётный прибор ИТ был установлен на внешней части КА «Луна-22» и впервые в мировой практике с его помощью был осуществлен длительный эксперимент (суммарное время работы 128 часов) по исследованию триботехнических характеристик ТСП в условиях космического пространства на орбите Луны.

Полученные результаты трибологических испытаний в земных условиях и на орбите Луны имеют достаточно высокий уровень корреляции. Таким образом, результаты испытаний показывают, что созданный в АО «НПО Лавочкина» комплекс наземного оборудования позволяет проводить трибологические испытания отдельных узлов трения и механизмов КА и с

достаточным уровнем достоверности прогнозировать функциональные характеристики и работоспособность этих узлов в условиях космического пространства.

3. Самосмазывающиеся антифрикционные материалы

Под самосмазывающимися или антифрикционными материалами понимаются материалы, которые могут работать в узлах трения КА без применения жидких, пластичных или твёрдых смазок.

Все жидкие и пластичные смазки, ТСП хоть и обладают высокими триботехническими характеристиками, широким диапазоном рабочих температур, однако их применение в условиях атмосфер планет Солнечной системы, в первую очередь Венеры, крайне затруднительно ввиду очень жёстких климатических условий.

Венера имеет экстремальные атмосферные условия. Атмосфера в основном состоит из углекислого газа с небольшим количеством азота. На поверхности давление достигает 9210 кПа, температура – плюс 462,1°С. Сплошной облачный покров находится на высотах от 47 до 72 км и состоит из паров серной кислоты [18-20].

В связи с этим возникает задача подбора материалов (пар трения) узлов трения космических аппаратов, осуществляющих спуск в атмосфере, посадку и работу на поверхности Венеры, которые могут функционировать при температурах выше плюс 450°С, что может быть обеспечено только за счёт применения самосмазывающихся антифрикционных материалов.

Отобранные в результате предварительных оценок и расчётов материалы деталей пары трения необходимо будет экспериментально исследовать. В первую очередь требуется провести лабораторную оценку материалов на образцах, основывающуюся на применении по возможности стандартизированных методик и оборудования, выборе схем взаимодействия образцов и режимов трения, близких к эксплуатационным, в соответствии с методами моделирования.

В качестве подобных материалов после проведённого предварительного анализа антифрикционных самосмазывающихся материалов можно рассмотреть углерод-углеродсодержащие композиционные материалы, частично стабилизированный цирконий, цирконий 702 с покрытием микродуговым оксидированием [21, 22].

В качестве ответных материалов (контртела) предполагается рассмотреть наиболее распространённые конструкционные металлические материалы КА: стали 40Х13, 30ХГСА, алюминиевый сплав АМг6, титановый сплав ВТ6.

Для подтверждения правильности выбора и исследования основных фрикционных характеристик предполагается провести комплекс трибологических испытаний данных материалов на испытательной стендовой базе отдела экспериментальной отработки и внедрения новых материалов (по схеме «вал – втулка» для условий открытого космоса: давление ниже 10^{-4} мм рт. ст., рабочие температуры $\pm 150^{\circ}\text{C}$), а также в ИМАШ РАН (по схеме «диск – палец» при температурах до плюс 700°C , [23], в среде углекислого газа [24-26].

По результатам данных испытаний можно будет сделать заключение о целесообразности и возможности применения данных материалов для узлов трения КА

длительного функционирования, работающих в условиях открытого космоса и (или) атмосферы Венеры.

Заключение

В статье произведён обзор основных антифрикционных материалов и покрытий, применяемых в узлах трения элементов конструкций космических аппаратов производства АО «НПО Лавочкина».

Применяемые смазочные материалы и покрытия в настоящее время в целом обеспечивают потребности космической техники. Однако есть направления, требующие доработки имеющихся смазочных материалов или внедрения новых антифрикционных материалов.

В частности, имеющиеся пластичные смазки и ТСП могут функционировать только при температурах до плюс 400°С, но не могут применяться в конструкции КА, работающих на поверхности Венеры, что приводит к необходимости применения для данных КА самосмазывающихся антифрикционных материалов.

Предложены новые перспективные самосмазывающиеся антифрикционные материалы. Требуется проведение их лабораторной отработки и трибологических испытаний для подтверждения целесообразности и возможности их применения для узлов трения, работающих в условиях открытого космоса и (или) атмосферы Венеры.

Список источников

1. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машгиз, 1992. - 383 с.
2. Космические смазки. URL: <http://www.bibliotekar.ru/6-smazka/36.htm>

3. Гришин С.А., Захаров Ю.В., Защирицкий С.А., Лошаков В.А. и др. Метод моделирования посадки аппарата на поверхность Марса на динамическом стенде // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2020. № 1. С. 62-67.
4. Маленков М.И., Каратушин С.И., Тарасов В.М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2007. – 54 с.
5. Ярош В.М., Моишеев А.А., Броновец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 6. С. 626–635.
6. Смазки пластичные. Справочник. URL: <http://www.aksioma55.ru/oils/russia/russia14-1.html>
7. Смирнов М.М., Малюгин А.С. Разработка полимерного композиционного материала, не обладающего «СТОП-ЭФФЕКТОМ» для изготовления направляющих прецизионного и особо точного оборудования авиационных предприятий // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29174>
8. Равикович Ю.А., Ермилов Ю.И., Холобцев Д.П., Ардатов К.В., Напалков А.А., Шах Д.И. Экспериментальное исследование работы подшипников скольжения с жидкостной смазкой в нештатных режимах // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26119>
9. ГОСТ 7142-74. Смазки пластичные. Методы определения коллоидной стойкости. Межгосударственный стандарт. 1975. - 69 с.

10. ГОСТ 9433-80. Смазка ЦИАТИМ-221. Технические условия. Государственный стандарт. 1982. - 3 с.
11. ТУ38-101475-74. Технические условия. Смазка ВНИИ НП-220. 1975. – 17 с.
12. ГОСТ 19337-73. Смазка ВНИИ НП-274. Технические условия. Государственный стандарт. 1975. – 4 с.
13. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. - М.: Транспорт, 1987. - 223 с.
14. Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике: в 3 томах. - М.: Машиностроение; - Варшава. Т. 1-3. – 1546 с.
15. Фукс И.Г., Буяновский И.А. Введение в трибологию. - М.: Нефть и газ, 1995. – 278 с.
16. Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. - М.: МАТИ, 2012. – 256 с.
17. MODENGY-1001: Основные свойства и области применения покрытия. URL: <https://borfi.ru/press/416.html>
18. Курков А.А. Эволюция атмосферы Венеры, Земли и Марса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 2-2. С. 260-264.
19. Кондратьев К.Я., Крупенин Н.Н., Селиванов А.С. Планета Венера. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 276 с.
20. Алексеев В.А., Минчин С.П. Венера раскрывает тайны. – М.: Машиностроение, 1975. – 96 с.

21. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Тюрин В.Н. Микродуговое оксидирование циркониевых сплавов в технологии покрытий для перспективных двигателей и энергоустановок // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=24765>
22. Федоров В.А., Обухов В.А., Могулкин А.И. Исследование температурного деформирования электродов ионно-оптической системы на основе континуальной термомеханической расчетной модели // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=52975>
23. Алисин В.В., Рошин М.Н., Лукьянов А.И., Воронцов В.А. и др. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2019. № 1. С. 61-65.
24. Alisin V.V., Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A. Modeling of friction engagement in a joint with carbon-carbon composite bushings in the atmosphere of Venus // Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1679 (4), pp. 042059. DOI: [10.1088/1742-6596/1679/4/042059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042059)
25. Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A. Tribology of carbon-containing materials in the carbon dioxide environment at high temperatures // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, pp. 062063. DOI: [10.1088/1757-899X/862/6/062063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062063)
26. Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A., Vorontsov V.A. Dependence of the friction coefficient in a carbon dioxide medium at high temperatures // AIP Conference Proceedings, 2021, vol. 2402, pp. 020008. DOI: [10.1063/5.0071645](https://doi.org/10.1063/5.0071645)

References

1. Kragel'skii I.V. *Trenie i iznos* (Friction and wear), Moscow, Mashgiz, 1992, 383 p.
2. *Kosmicheskie smazki*. URL: <http://www.bibliotekar.ru/6-smazka/36.htm>
3. Grishin S.A., Zakharov Yu.V., Zashchirinskii S.A., Loshakov V.A. et al. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2020, no. 1, pp. 62-67.
4. Malenkov M.I., Karatushin S.I., Tarasov V.M. *Konstruktсионnye i smazochnye materialy kosmicheskikh mekhanizmov* (Structural and lubricants of space mechanisms): textbook. Saint Petersburg, Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 54 p.
5. Yarosh V.M., Moishev A.A., Bronovets M.A. *Trenie i iznos*, 2003, vol. 24, no. 6, pp. 626–635.
6. *Smazki plastichnye. Spravochnik*. URL: <http://www.aksioma55.ru/oils/russia/russia14-1.html>
7. Smirnov M.M., Malyugin A.S. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29174>
8. Ravikovich Yu.A., Ermilov Yu.I., Kholobtsev D.P., Ardatov K.V., Napalkov A.A., Shakh D.I. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26119>
9. *GOST 7142-74. Smazki plastichnye. Metody opredeleniya kolloidnoi stoikosti* (GOST 7142-74. State standard. Lubricants are plastic. Methods for determining colloidal resistance), 1975, 69 p.
10. *GOST 9433-80. Smazka TsIATIM-221. Tekhnicheskie usloviya*. (GOST 9433-80. State standard. CYATIM-221 lubricant. Technical conditions), 1982, 3 p.

11. TU38-101475-74. *Tekhnicheskie usloviya. Smazka VNII NP-220.* (TU38-101475-74. Technical specifications. Lubrication of VNII NP-220), 1975, 17 p.
12. GOST 19337-73. *Smazka VNII NP-274. Tekhnicheskie usloviya* (GOST 19337-73. State standard. Lubrication of VNII NP-274, Technical conditions), 1975, 4 p.
13. Bushe N.A. *Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh* (Friction, wear and fatigue in machines), Moscow, Transport, 1987, 223 p.
14. Khebda M., Chichinadze A.V. *Spravochnik po tribotekhnike* (Handbook of Tribotechnics), Moscow- Warsaw, vol. 1.-3, 1546 p.
15. Fuks I.G., Buyanovskii I.A. *Vvedenie v tribologiyu* (Introduction to tribology), Moscow, Neft' i gaz, 1995, 278 p.
16. Khopin P.N. *Kompleksnaya otsenka rabotosposobnosti par treniya s tverdostmazochnymi pokrytiyami v razlichnykh usloviyakh funktsionirovaniya* (Comprehensive assessment of the performance of friction pairs with hard–lubricating coatings in various operating conditions), Moscow, MATI, 2012, 256 p.
17. MODENGY-1001: *Osnovnye svoistva i oblasti primeneniya pokrytiya.* URL: <https://borfi.ru/press/416.html>
18. Kurkov A.A. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2016, no. 2-2, pp. 260-264.
19. Kondrat'ev K.Ya., Krupenin N.N., Selivanov A.S. *Planeta Venera* (Planet Venus), Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 276 p.
20. Alekseev V.A., Minchin S.P. *Venera raskryvaet tainy* (Venus reveals secrets), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 96 p.

21. Lesnevskii L.N., Lyakhovetskii M.A., Tyurin V.N. *Trudy MAI*, 2011, no. 43. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24765>
22. Fedorov B.A., Obukhov V.A., Mogulkin A.I. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=52975>
23. Alisin V.V., Roshchin M.N., Luk'yanov A.I., Vorontsov V.A. et al. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2019, no. 1, pp. 61-65.
24. Alisin V.V., Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A. Modeling of friction engagement in a joint with carbon-carbon composite bushings in the atmosphere of Venus, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679 (4), pp. 042059. DOI: [10.1088/1742-6596/1679/4/042059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042059)
25. Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A. Tribology of carbon-containing materials in the carbon dioxide environment at high temperatures, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 862, pp. 062063. DOI: [10.1088/1757-899X/862/6/062063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062063)
26. Roshchin M.N., Markachev N.A., Bogachev V.A., Vorontsov V.A. Dependence of the friction coefficient in a carbon dioxide medium at high temperatures, *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2402, pp. 020008. DOI: [10.1063/5.0071645](https://doi.org/10.1063/5.0071645)

Статья поступила в редакцию 26.07.2023

Одобрена после рецензирования 19.08.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 26.07.2023; approved after reviewing on 19.08.2023; accepted for publication on 27.10.2023