

*М.И. МАЛЕНКОВ,  
С.И. КАРАТУШИН,  
В.М. ТАРАСОВ*

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
И СМАЗОЧНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
КОСМИЧЕСКИХ  
МЕХАНИЗМОВ**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

*М.И. МАЛЕНКОВ,  
С.И. КАРАТУШИН, В.М. ТАРАСОВ*

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2007

УДК 629.78:[620.22+621.892](075.8)  
М18

**Маленков, М.И.**

**М18** Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов: учебное пособие / М.И. Маленков, С.И. Каратушин, В.М. Тарасов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 54 с.  
ISBN-5-85546-283-8

Пособие содержит систематизированные сведения по триботехническим материалам для работы в условиях космического пространства. Приведены результаты испытаний отдельных узлов в виде редукторов и шарниров. Отдельной главой представлены материалы для работы в реакторной зоне.

Предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по специальности «Триботехника»

**УДК 629.78:[620.22+621.892](075.8)**

*Рецензенты:* канд. техн. наук, доц. БГТУ «Военмех»  
*Ю.А. Петренко*; д-р техн. наук, проф. кафедры машиноведения  
и деталей машин ГОУ ВО СПбГПУ *В.В. Носов*

*Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета*

**ISBN-5-85546-283-8**

© БГТУ, 2007  
© Авторы, 2007



## **ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, любой механизм представляет собой совокупность подвижно соединенных звеньев, совершающих определенные целесообразные движения под действием приложенных к нему сил. Все механизмы, предназначенные для эксплуатации не только на Земле, но и за ее пределами, в космическом пространстве, включая небесные тела с различными свойствами, относят к механизмам космического назначения. Такие механизмы должны работать при проведении различного рода проверок и испытаний в земных условиях, сохранять работоспособность при доставке космических аппаратов (КА) на космические орбиты или на поверхность небесных тел, а также обеспечивать надежную работу в течение заданного ресурса в условиях воздействия всех неблагоприятных факторов космического полета или данного небесного тела.

Космические механизмы, например тренажеры космонавтов, могут быть размещены в гермоотсеках КА, космических кораблей и орбитальных станций, где поддерживаются атмосфера и климатические условия, близкие к земным. Здесь обеспечивается также тот или иной уровень защиты от космического излучения. На борту пилотируемых КА в принципе можно предусмотреть частичный ремонт или замену проблемных механизмов. В настоящем пособии рассматриваются материалы космических механизмов, предназначенных для эксплуатации в открытом космосе – во враждебной человеку среде. Это, например, механизмы стыковочных устройств КА, поворотные механизмы раскрытия антенн, створок и других элементов конструкции. Если подобные механизмы устанавливаются на многоразовых КА, периодически

возвращаемых на Землю, то имеется возможность их многократного осмотра и ремонта.

В наиболее жестких режимах эксплуатируются механизмы межпланетных автоматических станций и их посадочных блоков, предназначенных для изучения и освоения Луны, Марса и других небесных тел. Это, например, ходовая часть и другие механизмы луноходов и марсоходов, механизмы наведения научной аппаратуры КА, рассчитанные на длительную работу на орбитах искусственных спутников. Возможности профилактического осмотра, тем более ремонта и замены таких механизмов практически исключены. Требуемые фрикционные характеристики, работоспособность и заданный ресурс шарниров, зубчатых передач и других пар трения космических механизмов этого класса должны быть обеспечены правильным выбором конструкционных и смазочных материалов и подтверждены при всесторонней наземной экспериментальной отработке.

В настоящем пособии рассматриваются, главным образом, конструкционные и смазочные материалы для механизмов, размещенных вне гермоотсеков и предназначенных для длительного пребывания и работы в космическом пространстве, на орбитах искусственных спутников, а также на поверхности Луны и Марса. Звенья этих механизмов должны иметь необходимые прочность и жесткость, обеспечивать требуемые траектории движения исполнительных элементов или полезной нагрузки. Выполнение этих задач, как правило, не порождает каких-либо новых проблем, отличных от проблем проектирования и расчета механизмов, предназначенных для эксплуатации в земной атмосфере. Более сложным оказывается проектирование шарниров и других пар трения. Здесь требуется индивидуальный подход к каждой паре, комплексный учет особенностей ее эксплуатации, тепловых, силовых, кинематических и триботехнических характеристик, условий сопряжения с другими механизмами и системами КА и т.п. Цель настоящего пособия – описать возможные пути выбора конструкционных и смазочных материалов шарниров и других пар трения на основе анализа опыта проектирования космических механизмов.

# 1. ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЗМОВ

## 1.1. Этапы эксплуатации

Узлы трения бортовых механизмов КА, предназначенных для эксплуатации на поверхности Луны или Марса, в общем случае должны функционировать в земных условиях при проведении приемо-сдаточных испытаний (ПСИ), при автономных и комплексных испытаниях, а также в вакууме на поверхности Луны или в среде разреженного углекислого газа на поверхности Марса.

Кроме того, как и КА в целом, космические механизмы должны сохранять работоспособность после воздействия неблагоприятных факторов, возникающих:

- при предполетном хранении в складских помещениях, в составе ракетного комплекса вне помещений и при транспортировке на стартовую позицию;
- при доставке ракетой-носителем на орбиту искусственного спутника Земли;
- при перелете на орбиту искусственного спутника небесного тела;
- при посадке автоматической станции на поверхность Луны или Марса.

При этом не исключается необходимость работы отдельных механизмов на этапе перелета, как и на орбитальных этапах существования КА. Физические условия работы на этих этапах весьма близки, что позволяет далее рассматривать их совместно.

### 1.1.1. Наземный этап

Наземная отработка космических изделий предполагает обязательные технологические проверки и испытания, проводимые в сборочных цехах, лабораториях и в контрольно-испытательной станции (КИС) при нормальных климатических условиях (НКУ): среда – атмосферный воздух при температуре  $(18 \pm 5)^\circ\text{C}$  и влажности 40%. Максимальная продолжительность этих испытаний обычно устанавливается с учетом полного ресурса работы изде-

лий. Таким проверкам, завершающимся приемо-сдаточными испытаниями, подвергаются все образцы космической техники, включая летные. Зачастую летные образцы проверяют еще и на функционирование без нагрузки в условиях, имитирующих космическое пространство.

Полному комплексу наземных испытаний, при которых имитируется не только среда, но и нагрузки, подвергаются опытные образцы механизмов. При правильной постановке дела опытные образцы для предварительных (конструкторско-доводочных) испытаний отличаются от летных только назначением, но не конструкцией.

Наземную отработку с имитацией космических условий эксплуатации проводят в термовакуумных камерах (ТВК) и на другом оборудовании, позволяющем воспроизводить эти условия, включая режимы нагружения, комплексно или, чаще всего, в отдельных фрагментах. Это означает, что, по крайней мере, ресурсные испытания и проверки правильности функционирования механизмов в ТВК следует производить при их работе, движении звеньев под нагрузкой. Конечно, такой подход существенно усложняет испытательное оборудование и сам процесс испытаний. Как правило, он требует создания специального оборудования под каждый механизм.

Другой достаточно сложной проблемой является подтверждение длительных (до 10-15 лет) сроков пребывания, а подчас и ресурса работы механизмов в открытом космосе. Здесь также необходим индивидуальный подход, учитывающий результаты анализа эксплуатации и испытаний аналогов вновь проектируемых механизмов или их отдельных компонентов, пар трения, смазок, отдельных узлов.

Хранение в складских помещениях производится при температуре  $(20 \pm 15)^\circ\text{C}$  и влажности не выше  $40^\circ\text{C}$ , хранение и возможные предстартовые проверки на функционирование в составе ракетного комплекса – при температуре от  $-50^\circ$  до  $40^\circ\text{C}$  и влажности до 98 %. Испытания на хранение проводят в стандартных климатических камерах и (учитывая обычно задаваемые в ТЗ длительные сроки хранения от года до трех лет) по специальным, ускоренным программам.

Транспортировка механизмов в таре или в составе КА на Земле может производиться автомобильным, железнодорожным



и авиационным транспортом. Поэтому, как правило, требуется подтверждение стойкости механизмов к воздействию перегрузок, характерных для каждого вида транспорта.

При доставке на орбиту на космическое изделие воздействуют резкое изменение давления от атмосферного до вакуума, ударные, вибрационные и акустические перегрузки от работы двигателей и систем разделения ступеней ракеты-носителя. Нужно отметить, что механические перегрузки характеризуются широким спектром частот. Программа механических испытаний обычно включает в себя технологические проверки качества сборки и контроля на некоторых фиксированных частотах, испытания на вибропрочность, на определение резонансных частот и на виброудар.

Если тот или иной механизм или система его управления должна функционировать при воздействии вибраций, то могут быть назначены дополнительные механические испытания на виброустойчивость. Эти испытания предполагают включение электронных блоков, электрических цепей и движение звеньев механизмов без нагрузки непосредственно на работающем стенде, что, конечно, усложняет методику испытаний.

В ряде случаев, при создании новых образцов космической техники, не имеющих прямых аналогов, проводят испытания на электромагнитную совместимость. Эти испытания, а также все механические испытания, включая транспортные перегрузки, проводят при НКУ.

Выше речь шла только о завершающих этапах испытаний пар трения в составе собранных механизмов. На практике этим испытаниям нередко предшествуют работы по изысканию и отработке отдельных пар трения, результаты которых приведены далее.

### *1.1.2. Космический этап*

При перелете к Луне или Марсу изделие подвергается длительному воздействию космического вакуума, температурных перепадов в диапазоне от - 150 до 150°С, радиационному воздействию космического излучения, невесомости, а также ударных нагрузок во время работы корректирующих двигателей. Все эти факторы характерны и для работы КА на орбитах.

Эксплуатация изделий на Луне сопровождается воздействием космического вакуума, широкого диапазона температур (от - 150 до 150 °С), микрометеорного потока частиц и радиации, пониженной гравитации, необходимостью движения по неподготовленной местности с разнообразными рельефами и грунтами и повсеместным распространением мелкого песка.

Условия эксплуатации на Марсе отличаются наличием разреженной газовой среды, состоящей на 95 % из углекислого газа, возможностью пылевых бурь, низкими температурами, пониженной гравитацией.

В табл.1 приведены условия окружающей среды на различных этапах эксплуатации космических изделий.

Т а б л и ц а 1

**Условия окружающей среды на различных этапах эксплуатации космических изделий**

Параметры	На поверхности Земли	При выводе на орбиту	Перелет на планету	На поверхности	
				Луны	Марса
Давление газовой среды	100 кПа	100 кПа...10 <sup>-4</sup> Па	10 <sup>-4</sup> Па...10 <sup>10</sup> Па	< 10 <sup>-10</sup> Па	0,6 кПа
Газовый состав атмосферы	N <sub>2</sub> -78%, O <sub>2</sub> -21%, Ar-1%, 2,5-10-3%Н <sub>2</sub> , He, N	N <sub>2</sub> ; O; O <sub>2</sub> ; Ar; He; N	H; He		CO <sub>2</sub> - 95% N <sub>2</sub> - 2...3% O <sub>2</sub> -0,1...0,4%
Температура, °С	-50...45	± 110	± 150	-150...130	-120...30
Влажность, %	до 98	0	0	0	0
Ускорение силы тяжести, м/с <sup>2</sup>	9,8			1,62	3,72
Интегральная доза радиации за защитой 0,01 г/см <sup>2</sup> по алюминию (Al), рад				За 1 год эксплуатации 1·10 <sup>5</sup>	За 2 года эксплуатации 2·10 <sup>5</sup>

Таким образом, условия эксплуатации узлов трения планетоходов, предназначенных для работы на Луне, отличают следующие особенности:

1) необходимость обеспечения работоспособности в вакууме после ПСИ на воздухе (в окислительной среде);

- 2) широкий диапазон температур от - 150 до +150 °С;
- 3) воздействие ударных и вибрационных перегрузок;
- 4) пониженная сила гравитации;
- 5) сложный рельеф местности, наличие препятствий и песка на поверхности;
- 6) космическая радиация.

Наиболее ярко выраженные отличительные особенности условий эксплуатации планетохода на Марсе по сравнению с Луной:

- 1) среда разреженного углекислого газа;
- 2) преобладание отрицательных температур до - 120 °С;
- 3) длительное, до 1 года, время пребывания в космосе при доставке на планету.
- 4) пылевые бури.

Остальные условия эксплуатации марсохода и лунохода имеют много общего.

### **1.2. Влияние факторов космического пространства на материалы пар трения**

Работоспособность большинства металлов в парах трения на воздухе связана с образованием на поверхностях окисных и адсорбированных пленок, способствующих снижению износа и потерь на трение. По мере износа эти пленки на воздухе быстро восстанавливаются. Влияние вакуума на узлы трения проявляется в интенсивном разрушении и разложении поверхностных окисных и адсорбированных пленок. С увеличением степени разрежения среды увеличивается время их восстановления, возрастает вероятность появления и схватывания ювенильных поверхностей. Быстроходность и нагруженность узла сокращают возможности восстановления пленок. Кроме того, в вакууме повышается теплонагруженность узлов трения вследствие ухудшения условий теплопередачи, прекращается теплообмен путем конвекции и теплопроводности. Единственным способом отвода тепла в вакууме является тепловое излучение.

На Марсе атмосфера состоит из разреженного углекислого газа с примесью азота и кислорода. Влияние среды углекислого газа на фрикционные характеристики материалов исследовалось различными авторами. Механизм влияния  $\text{CO}_2$  на фрикционные характеристики обусловлен процессами окисления поверхности

трения. По своей окислительной способности в области относительно невысоких температур и давления  $\text{CO}_2$  уступает чистому кислороду и воздуху, но значительно превосходит нейтральные среды или вакуум. Окислительная способность  $\text{CO}_2$  в динамических условиях (при трении) выше, чем в статических. Его влияние в различных парах трения проявляется по-разному. Для закрытых пар, работающих при больших нагрузках, оно может быть минимальным в силу затрудненности поступления газа к поверхностям трения.

Небольшие примеси (несколько процентов) кислорода и инертных газов в  $\text{CO}_2$  не влияют на фрикционные характеристики материалов, поэтому допустимо при положительных температурах применительно к марсианским условиям использовать технический (пищевой)  $\text{CO}_2$ . Однако в связи с тем, что окисные пленки, образующиеся в  $\text{CO}_2$ , влияют на износ иначе, чем пленки, образующиеся в кислороде, нецелесообразно для фрикционных испытаний заменять среду  $\text{CO}_2$  на кислород или его смеси с инертными газами.

Износостойкость материала в среде  $\text{CO}_2$  определяется износостойкостью и механической прочностью поверхностных пленок, а также фрикционными свойствами продуктов износа. Если поверхностная пленка износостойка и устойчива к окисляющему действию  $\text{CO}_2$ , то фрикционные характеристики не будут изменяться до тех пор, пока она существует. Наиболее действенным методом предотвращения схватывания и снижения износа и потерь на трение в вакууме или среде разреженного углекислого газа является образование разделительного слоя, выполняющего роль смазки.

Но, поскольку длительной эксплуатации узлов трения на планете предшествуют ПСИ на воздухе, этот разделительный смазочный слой должен обеспечить работоспособность узлов трения при проведении ПСИ в окислительной среде на воздухе без ухудшения антифрикционных характеристик при последующей эксплуатации в вакууме (для лунохода) или среде разреженного углекислого газа (для марсохода).

В процессе эксплуатации на изделие действуют низкие температуры: на Луне до  $-150^\circ\text{C}$ , на Марсе – до  $-120^\circ\text{C}$ . Такие температуры вызывают изменение физико-механических свойств конструкционных и смазочных материалов. Для всех деформируемых и многих литых сталей и сплавов повышаются пределы

прочности и текучести при растяжении, твердость и модуль упругости. Пластичность и ударная вязкость изменяются различно в зависимости от типа кристаллической решетки: наименьшие изменения эти характеристики претерпевают у металлов и сплавов с гранцентрированной кубической решеткой, а также у нержавеющей сталей аустенитного класса. Аналогично ведут себя сплавы меди, никеля, титана, алюминия. При этих температурах теряют эластичность и становятся хрупкими пластмассы, резко изменяются характеристики пластичных смазок. Лучшие из известных современных пластичных смазок на основе сложных эфиров обеспечивают работоспособность пар трения при температурах не ниже – 100...110°C. При более низких температурах они способны в разы увеличить сопротивление перемещению и совершенно затвердевают при температуре - 120...130°C. По этой причине в ряде случаев необходима активная система обеспечения требуемого теплового режима, значительно усложняющая и утяжеляющая конструкцию узла. Кроме того, из-за широкого диапазона температур, действующих на изделие на различных этапах эксплуатации, требуется применять в сопряженных деталях материалы с близкими коэффициентами теплового расширения.

При выводе космического корабля на околоземную орбиту на него действуют вибрационные и ударные перегрузки. Степень их влияния на рабочие поверхности пар трения зависит от зазоров в парах, которые, в свою очередь, зависят от температурного диапазона эксплуатации изделия, теплофизических характеристик материалов сопрягаемых деталей, класса точности сопряжения. При прохождении плотных слоев атмосферы вибрации могут вызвать интенсивное разрушение поверхностей контактирующих деталей – так называемый фреттинг. Первопричиной фреттинга является фрикционное взаимодействие соприкасающихся номинально неподвижных поверхностей, происходящее в результате их относительных микросмещений в условиях вибраций. Вибрационные нагрузки способствуют интенсивному росту упруго-пластических деформаций, в несколько раз превышающих деформации, развивающиеся при трении без вибрации, и ускоренному своеобразному усталостному разрушению поверхностных слоев материалов. При отсутствии вибраций деформация достигает соизмеримой величины лишь при увеличении нагрузки в несколько десятков раз. При наличии окислительной среды разви-

ваются процессы фреттинг-коррозии. Из всех видов динамических нагрузок, действующих на изделие, вибрация является самым опасным. Для Лунохода при выводе космического корабля на околоземную орбиту вибрации составляли  $10^7$  циклов нагружений, тогда как число ударов в тот же период эксплуатации измерялось единицами. Поэтому окончательной оценке фрикционных характеристик узла трения должна предшествовать экспериментальная проверка его вибростойкости.

Пониженная сила гравитации на Луне и Марсе увеличивает динамический характер нагружения узлов трения. Сложный рельеф поверхности, препятствия в виде каменных россыпей, дефицит информации бортовых систем о поверхности приводят к необходимости движения в “старт-стопном” режиме. При этом максимальные и номинальные нагрузки могут различаться на порядок. Мелкий песок и камни на поверхности планеты вызывают абразивный износ деталей движителя планетохода. Кроме того, мелкий песок при попадании в узел трения может привести к его катастрофическому износу и отказу. Эффективными элементами защиты от пыли могут быть различные контактные и бесконтактные уплотнения.

Планетоходы при доставке на Луну или Марс и в процессе эксплуатации на поверхности этих небесных тел подвергаются интенсивному радиационному облучению. Действие радиации на материалы проявляется по-разному. Так, накопление в металле радиационных дефектов может вызывать изменение его характеристик. С ростом концентрации дефектов увеличиваются остаточное электрическое сопротивление металлов, геометрические размеры деталей, ускоряются процессы старения некоторых сплавов. Однако в пределах времени активного существования планетоходов эти изменения незначительны.

В полимерах под действием облучения протекают процессы двух типов: сшивание и деструкция. Сшивание может приводить к повышению как прочности и термостойкости, так и хрупкости. Деструкция сопровождается ухудшением механических свойств полимеров.

Действие радиации на пластичные смазки может изменять их физико-механические характеристики: испаряемость, вязкость, что, в свою очередь, снижает антифрикционные свойства смазок.

Микрометеорный поток частиц воздействует на наружную поверхность космического аппарата, вызывая эрозию поверхно-

сти, локальные повреждения приборов и оборудования. Основная масса узлов трения планетохода защищена корпусными деталями. Очевидно, что воздействию микрометеорного потока подвержены только детали движителя (колеса, гусеницы и т.д.). Эрозией деталей движителя можно пренебречь по сравнению с их абразивным износом при взаимодействии с грунтом поверхности.

Влажность атмосферного воздуха при хранении и предстартовой подготовке изделия также может отрицательно воздействовать на конструкционные и смазочные материалы узлов трения. При выборе материалов предпочтение отдают коррозионностойким материалам. Для материалов с недостаточной коррозионной стойкостью необходимо предусматривать методы защиты от коррозии, не ухудшающие фрикционные характеристики пар трения.

### ***Вопросы для самопроверки***

- 1. В чем отличие условий эксплуатации узлов трения самоходных шасси луноходов и марсоходов?*
- 2. Как влияет вакуум на тепловой режим узлов трения космических механизмов?*
- 3. Как низкие температуры влияют на работоспособность материалов трения?*
- 4. Какие факторы и в какой мере влияют на состояние пар трения механизмов на этапе перелета космического аппарата от Земли к месту эксплуатации: к Луне? К Марсу?*
- 5. Какие физические факторы отрицательно воздействуют на работоспособность космических механизмов?*

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **2.1. Конструкционные материалы**

В космическом машиностроении в качестве конструкционных материалов наиболее часто используются стали, алюминиевые и титановые сплавы. Химический состав и механические характеристики сталей, титановых и алюминиевых сплавов, наиболее часто применяемых в ответственных деталях космических изделий, приведены в табл. 2 - 5.

Т а б л и ц а 2

**Химический состав сталей в весовых процентах  
(остальное – железо)**

Марка материала	Углерод С	Хром Cr	Никель Ni	Кремний Si	Марганец Mn	Ванадий V	Сера S		Фосфор P	
							не более		не более	
30X13	0,26...0,35	12,0...14,0	—	0,8 не более	0,8 не более	—	0,025		0,030	
20X17Н2	0,17...0,25	16,0...18,0	1,5...2,5	0,8 не более	0,8 не более	—	0,025		0,035	
38ХС	0,34...0,42	1,3...1,6	—	1,0...1,4	0,3...0,6	—	0,025		0,030	
18Х2Н4МА	0,14...0,20	1,35...1,65	4,0...4,4	0,17...0,37	0,25...0,55	—	0,025		0,030	
45ХН2МФА	0,42...0,50	0,80...1,10	1,3...1,8	0,17...0,37	0,50...0,80	0,10...0,18	0,025		0,030	

Т а б л и ц а 3

**Химический состав титановых сплавов в весовых процентах  
(остальное – титан)**

Марка материала	Алюминий Al	Молибден Mo	Хром Cr	Железо Fe	Кремний Si	Ванадий V
BT 3-1	5,5...7,0	2,0...3,0	0,8...2,3	0,2...0,7	0,15...0,40	-
BT 14	3,5...6,3	2,5...3,8	-	0,3 не более	0,15 не более	0,9...1,9
BT22	4,4...5,9	4,0...5,5	0,5...2,0	0,5...1,5	0,15 не более	4,0...5,5
ТС-5	5					2

Т а б л и ц а 4

**Химический состав алюминиевого сплава в весовых процентах  
(остальное – алюминий)**

Марка материала	Цинк Zn	Магний Mg	Медь Cu	Марганец Mn	Хром Cr	Железо Fe	Кремний Si	Никель Ni	Прочие примеси
B95	5,0-7,0	1,8-2,8	1,4-2,0	0,2-0,6	0,1-0,25	0,5	0,5	0,1	0,1



Т а б л и ц а 5

**Физико-механические характеристики сталей,  
титановых и алюминиевых сплавов**

Марка материала	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5$	$\psi$	$a_n$	Твердость НВ
	МПа		%		Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )	
	не менее					
30X13	950	800	9	45	49 (5)	241
14X17H2	1000	850	10	30	49 (5)	285
20X17H2	1000	850	10	30	49 (5)	285
38XC	930	735	12	50	69 (7)	255
18X2H4MA	1130	835	12	50	98 (10)	269
45XH2MФА	1420	1275	7	35	39 (4)	269
BT3-1	1200	1100	8	20	19,5 (2)	285
BT-14	1200	1100	12	12	24,5 (2,5)	285
BT-22	1500	1400	6	16	19,5 (2)	285
B-95	560	490	6	17	11,8 (1,2)	10/100/30 $\geq$ 150
TC-5	980		8			

$\sigma_b$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести, соответствующий остаточной деформации 0,2%;  $\delta_5$  – относительное удлинение при разрыве;  $\psi$  – относительное сужение при разрыве;  $a_n$  – ударная вязкость.

Указанные материалы обладают низкой работоспособностью в вакууме, которая может быть существенно повышена применением поверхностного упрочнения и различных смазочных материалов. Специальные металлокерамические материалы, созданные методами порошковой металлургии, обладают низкой склонностью к схватыванию в вакууме. К таким материалам относятся железостеклянные материалы С-5 и С-5Ф и титаностеклянный Т-4. Их структура представляет собой пористую матрицу с равномерно распределенными по объему частицами стекла, препятствующими схватыванию в процессе трения. Физико-механические характеристики этих материалов представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

**Физико-механические характеристики  
металлокерамических материалов**

Марка материала	$\sigma_b$ МПа	$\sigma_T$ МПа	$a_n$ Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
С-5 (С-5Ф)	590	740	4,9 (0,5)
Т-4	430	775	6,4 (0,65)

Относительно невысокие механические характеристики этих материалов ограничивают область их применения зубчатыми передачами при контактных нагрузках не выше 700 МПа.

Наиболее перспективные для работы без смазки материалы – металлокерамический С-5 и алюминиевый сплав В95Т с АОП – были испытаны в зубчатых парах мотор-редуктора лунохода в вакууме и углекислом газе.

На машине трения УТИ-1В были проведены испытания в среде воздуха и углекислого газа по оценке износостойкости без смазки конструкционных материалов. Результаты испытаний представлены на рис.1. Как следует из диаграммы, наибольшую износостойкость из исследованных сталей имеет сталь 20Х17Н2. Металлокерамические материалы обладают еще более высокой износостойкостью, которую превосходит алюминиевый сплав В95Т с анодно-окисным покрытием (АОП).

Результаты испытаний показали (табл. 7), что такие материалы обеспечивают без смазки ресурс работы зубчатых передач редуктора Лунохода в вакууме и углекислом газе при контактных нагрузках до 700 МПа. Материал контртела во всех испытаниях – сталь ШХ15.

Титановые сплавы обладают высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью и крайне низкими антифрикционными характеристиками при трении. Поэтому в узлах трения космической техники титановые сплавы применяются с модификацией поверхности и различными смазками и самосмазывающимися материалами.

Т а б л и ц а 7

**Результаты испытаний конструкционных материалов  
в зубчатых парах мотор-редуктора без смазки**

Зубчатая пара из материалов	Среда, давление	Температура, °С	Контактное напряжение, МПа	Ресурс	
				час	цикл
С-5 по С-5	Вакуум, $10^{-4}$ Па	-50...200	300...700	100	$2,7 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^4$
С-5 по С-5	CO <sub>2</sub> , $10^3$ Па	-50...120	300...700	90	$2,4 \cdot 10^7 \dots 4,5 \cdot 10^4$
В-95Т Ан.Окс.тв. по С-5	Вакуум, $10^{-4}$ Па	-50...200	300...700	100	$2,7 \cdot 10^7 \dots 5 \cdot 10^4$
В-95Т Ан.Окс.тв. по С-5	CO <sub>2</sub> , $10^3$ Па	-50...120	300...700	90	$2,4 \cdot 10^7 \dots 4,5 \cdot 10^4$

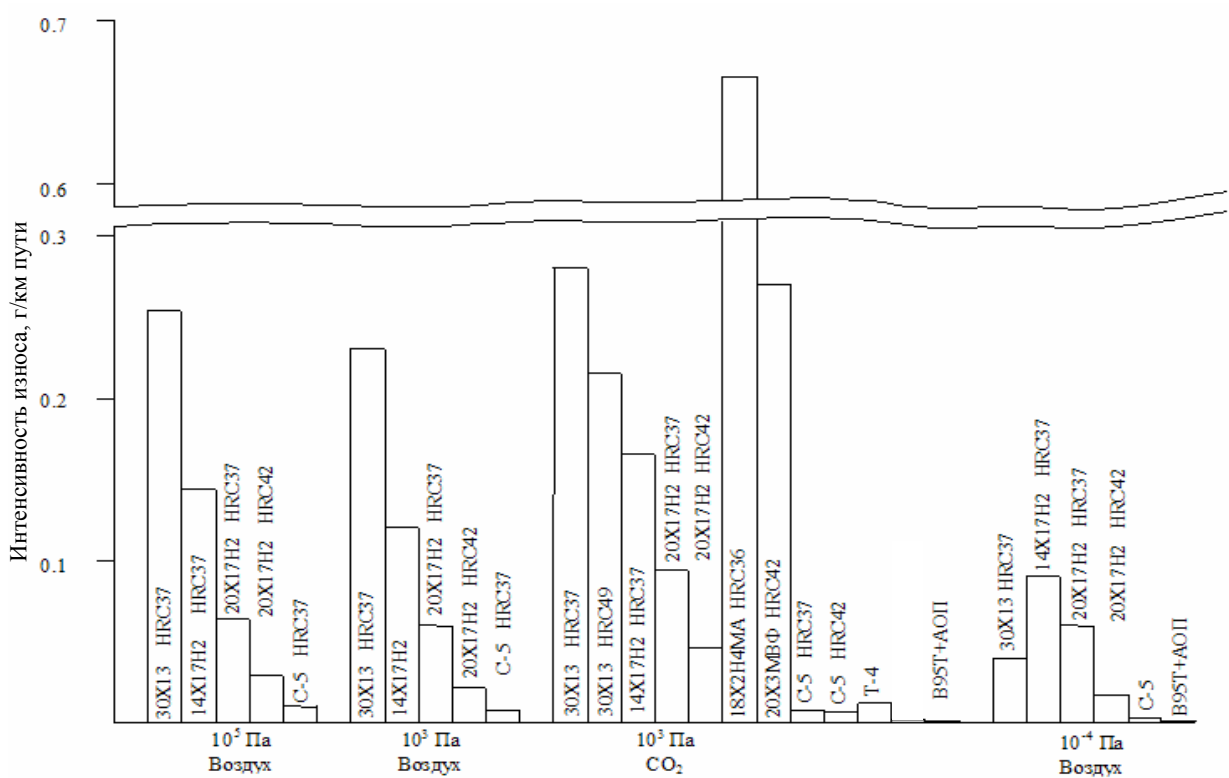


Рис. 1. Диаграмма износа конструкционных материалов при «сухом» трении в различных газовых средах (УТИ-1В, контактная нагрузка 2400 МПа, скорость скольжения 0,5 м/с, путь трения 1000 м)

В табл. 8 приведены рекомендации по методам упрочнения и области применения конструкционных материалов в узлах трения космических изделий.

Т а б л и ц а 8

**Методы упрочнения и рекомендации по применению конструкционных материалов**

Марка материала	Термообработка	Твердость	Применение
Сталь 30X13	Закалка и отпуск	269... 341 HB 43...47 HRC <sub>Э</sub>	Валы, оси, шестерни, работающие в слабоагрессивных средах
Стали 14X17H2, 20X17H2	То же	293... 341 HB 37...43 HRC <sub>Э</sub>	Валы, оси, втулки, шестерни, работающие в агрессивных средах при температурах до 400 °С
Сталь 18X2H4МА	>>	285... 341 HB	Валы, оси, шестерни, работающие при больших скоростях, вибрационных и ударных нагрузках
	Цементация, глубина слоя 0,8...1,2 мм 1,2...1,6 мм 1,6...1,9 мм	Твердость поверхности ≥60 HRC <sub>Э</sub> Твердость сердцевины 302...444 HB	Валы, оси, втулки, шестерни, червяки, работающие при больших скоростях, вибрационных нагрузках и повышенных контактных напряжениях
	Азотирование, глубина слоя 0,1...0,4 мм	Твердость ≥600 HV Твердость сердцевины 285...352 HB	
Сталь 45XH2МФА	Закалка и отпуск	378...444 HB 43...49 HRC <sub>Э</sub> 46...51 HRC <sub>Э</sub>	
Титановые сплавы BT3-1, BT14, BT22	Азотирование, глубина слоя 0,1...0,4 мм	Твердость ≥600 HV Твердость сердцевины 269...341 HB	Валы, оси, втулки, шестерни, работающие в агрессивных средах.
Титановый сплав TC5	То же	≥600 HV	Валы, оси, втулки, шестерни, работающие при температурах до 700°С
Алюминиевый сплав В95	Твердое анодирование, глубина слоя 50 мкм	≤ 400 HV	Мало- и средненагруженные валы, оси, втулки, шестерни.
С-5 С-5Ф Т-4	Закалка	40...52 HRC <sub>Э</sub>	Зубчатые колеса для работы в вакууме и CO <sub>2</sub> при контактных нагрузках до 700 МПа

## 2.2. Антифрикционные пластичные смазки

Антифрикционные пластичные смазки (ПС) для изделий космической техники должны обладать рядом специфических свойств по сравнению с ПС для наземной техники. Последние обеспечивают сравнительно узкий температурный диапазон работоспособности (- 50...150) °С, имеют высокую испаряемость и низкую радиационную стойкость. Кроме того, они обеспечивают необходимую долговечность пар трения лишь в кислородной среде, в которой на поверхностях трения образуются и в процессе эксплуатации восстанавливаются изношенные оксидные пленки, имеющие высокую износостойкость.

Узлы трения с ПС в изделиях космической техники обычно герметизируются, чем значительно снижается испаряемость смазок из объемов механизмов, однако возможность образования высокого вакуума в объемах не исключена. Кроме этого, ПС должны обеспечивать длительную работоспособность узлов трения в широком диапазоне температур (от - 110...130 до 160...200°С) и иметь достаточную радиационную стойкость. Но, так как ПС космических механизмов находятся в объемах за корпусной защитой, снижающей уровень радиации, радиационная стойкость не вызывает проблем.

На первом этапе (1960-75 гг.) для изделий космической техники (КТ) использовались смазки ВНИИНП-231,-234,-246 и другие на основе кремнийорганических жидкостей. Эти смазки давали возможность эксплуатировать изделия КТ при температурах от - 60...80 до + 200 °С (кратковременно до + 250°С). При более низких температурах требовался подогрев механизмов или они не работали.

Ввиду низких трибологических свойств ПС на кремнийорганических основах ресурс пар трения с этими смазками был весьма ограничен. Повышение его достигалось за счет применения этих смазок в парах трения, в которых либо поверхности имели износостойкие покрытия, либо детали (зубчатые колеса и др.) изготавливались из специальных композиционных материалов.

В механизмах самоходного шасси «Лунохода-1» и «Лунохода-2» была использована ПС ВНИИНП-246, обладавшая стойкостью к высоким температурам и относительно низкой испаряемо-

стью в вакууме (табл. 9). При отрицательных температурах луноходы не функционировали. Ресурс частично герметизированных узлов трения (с деталями, имеющими износостойкие покрытия или изготовленными из композиционных материалов) с ПС составил 100 часов. Успешная работа луноходов на Луне подтвердила эффективность выбранного решения по применению смазки ВНИИ НП-246.

Т а б л и ц а 9

Характеристики антифрикционных пластичных смазок

№	Наименование показателей	Наименование смазок							
		ВНИИ НП-246	Силена	НИКА	НИСА	НИРА	Аметист	Изумруд	
1	Жидкая основа	Кремний-органическая	Перфторполиэфирная						
2	Загуститель	Пигмент фталоцианиновый	Политетрафтор-этиленовый		Графитосодержащий		Органосиликагелевый		
3	Вязкость эффективная, Ст при минус 40 °С	400	> 110	> 30	< 100	< 250	60	< 120	
4	Предел прочности при 50 °С, Па	190	> 160	> 100	> 100	> 60	150–350	150–350	
5	Коллоидная стабильность при нагрузке 3Н, %	8,5	< 20	< 15	< 25	< 25	< 20	< 10	
6	Температурный диапазон эксплуатации, °С - длительно - кратко-временно	-60...200	130...160	-130...200	-130...165	-100...165	-110...200	-130...160	
		250	200	250	200	250	250	200	
7	Испаряемость в вакууме (сравнительная), % при 160 °С при 200 °С	-	3	6	6	8	8	5	
		10,5	-	-	-	-	-	-	

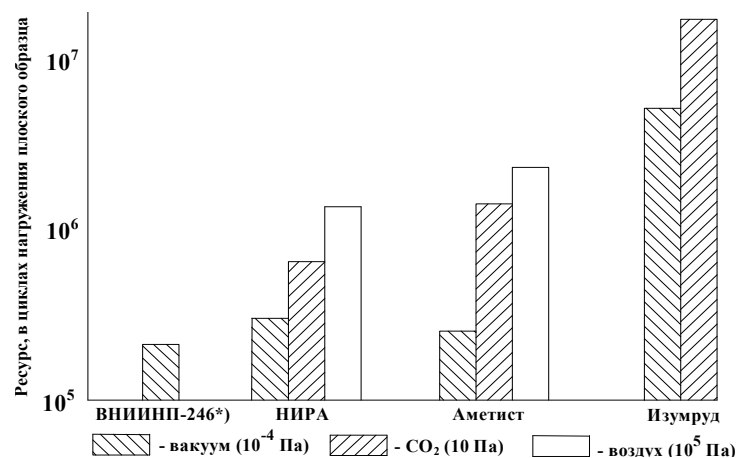
№	Наименование показателей	Наименование смазок					
		ВНИИ НП-246	Силена	НИКА	НИСА	НИРА	Аметист
8	Радиационная стойкость, рад	Более $10^5 \dots 10^6$ за защитой $0,01 \text{ г/см}^2$ по алюминию					
9	Назначение	Универсальная	Для подшипников качения	Для подшипников скольжения и червячных передач	Универсальные		

На втором этапе (начиная с 1975 г.) для пар трения космических механизмов были разработаны ПС на основе перфторполиэфиров (ПФПЭ) с различными загустителями: НИСА, «Силена», НИКА, НИРА, «Аметист» и др. (табл. 10). Эти смазки позволили, по сравнению со смазками 60-70-х годов, снизить минимальную температуру до  $-100 \dots 130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Их применение значительно повысило нагрузочную способность и долговечность пар трения. При этом использовались стали, алюминиевые и другие сплавы, хорошо зарекомендовавшие себя в наземной технике.

Однако при переходе от атмосферы воздуха к вакууму работоспособность ПФПЭ несколько снижается, а минеральных масел возрастает. В присутствии химически активных поверхностей и продуктов износа происходит кислотное разложение ПФПЭ. В вакууме в граничном режиме трения оксидные пленки на поверхности металла быстро изнашиваются и не восстанавливаются, что приводит к увеличению коэффициента трения, способствует схватыванию и заеданию. Поэтому необходимы добавки, либо восстанавливающие оксидные (или другие) пленки на поверхностях трения, либо препятствующие непосредственному контакту трущихся поверхностей. В работах отечественных и зарубежных ученых показано, что смазки на основе ПФПЭ имеют наиболее высокую работоспособность при граничном трении в вакууме с растворимыми в ПФПЭ антифрикционными присадками. На третьем этапе (начиная с 1990 г.) была разработана такая смазка на основе ПФПЭ – «Изумруд», содержащая растворимую в ПФПЭ металлоплакирующую присадку (табл. 9). Эта смазка позволила повысить ресурс пар трения более чем на порядок.

Ресурс стальных пар трения с некоторыми пластичными смазками в различных газовых средах по результатам испытаний

на машине трения В-3М (ролик-плоскость) приведен на диаграмме (рис. 2). Ролики - сталь 20 X17 H2, HRC 29, плоский образец – сталь 20X17H2, HRC 35...38, контактные напряжения  $9,05 \cdot 10^2$  МПа; скорость скольжения  $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , температура  $20^\circ\text{C}$ .



\* Контактные напряжения -  $6 \cdot 10^2$  МПа

Рис. 2. Ресурс пар трения с различными пластичными смазками (коэффициенты трения при ресурсных испытаниях были в диапазонах 0,08...0,11 в среде воздуха и 0,10...0,14 в вакууме и разреженном  $\text{CO}_2$ )

Пластичная смазка «Изумруд» имела наибольшую долговечность и сравнительно низкий и стабильный коэффициент трения при работе в вакууме и в среде разреженного углекислого газа. В процессе создания смазки были испытаны на долговечность более 20 опытных пластичных смазок, имеющих единую дисперсионную основу и загуститель с различными металлоплакирующими присадками. Часть этих смазок с присадками на основе солей бария, натрия и др. оказалась полностью неработоспособной. Однако имелись смазки, например содержащие соли кобальта, которые показали сравнимые с ПС «Изумруд» триботехнические характеристики.

Ресурс и КПД стальных зубчатых пар с пластичной смазкой «Аметист» по результатам испытаний на стенде В-49 приведены в табл. 10. Зубчатые колеса: центральные – ст.20X17H2, HRC 35; блочные – ст.20X17H2, HRC 30, модуль 1 мм.



Результаты испытаний подшипников качения повышенного класса точности из нержавеющей стали №6-29ЮТ (9×26×8) со смазкой «Аметист» при длительном пребывании в вакууме приведены в табл. 11. Нагрузка 0,2...1,0 кН, частота вращения 10...20 с<sup>-1</sup>, тип движения вращательный.

Т а б л и ц а 10

**Ресурс и КПД зубчатых пар с пластичной смазкой «Аметист»**

Среда, давление среды	Температура зубчатого колеса, °С	Контактные напряжения, МПа	Частота вращения, с <sup>-1</sup>	η КПД	Наработка, циклов нагружений	Причина прекращения испытаний
CO <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	-105	6,2·10 <sup>2</sup>	5	0,944	4,2·10 <sup>5</sup>	Заедание
	20	6,2·10 <sup>2</sup>	5	0,980	3,1·10 <sup>6</sup>	
	-100	1,2·10 <sup>2</sup>	35	0,950	1,0·10 <sup>6</sup>	
Вакуум, 10 <sup>-3</sup> Па	130	1,2·10 <sup>2</sup>	35	0,980	4,5·10 <sup>6</sup>	
	-100	1,2·10 <sup>2</sup>	35	0,965	6,7·10 <sup>5</sup>	
	-100	1,0·10 <sup>3</sup>	2	0,950	1,0·10 <sup>5</sup>	
	130	1,5·10 <sup>3</sup>	2	0,975	5,0·10 <sup>4</sup>	Зубчатые пары в работоспособном состоянии

Т а б л и ц а 11

**Испытания подшипников качения со смазкой «Аметист» при длительном пребывании в вакууме**

Температура подшипников, °С	Коэффициент трения	Длительность испытаний		Длительность пребывания, сутки	Примечание
		час, мин	число циклов вращений		
-120...-100	0,013...0,1	115 ч 30 мин	3,5·10 <sup>6</sup>	при (10 <sup>-3</sup> ...10) Па	Подшипники в удовлетворительном состоянии
-100...-50	0,010...0,006	69 ч 45 мин	2,1·10 <sup>6</sup>	- 119 суток;	
50...60	0,003...0,002	15 ч	4,5·10 <sup>5</sup>	при (10...10 <sup>5</sup> ) Па - 49 суток;	

Среда – вакуум 10<sup>-3</sup> Па; нагрузка 5,22 кН, контактные напряжения 5·10<sup>3</sup> МПа; тип движения - возвратно-вращательный с частотой 0,3 с<sup>-1</sup>.

Коэффициенты трения шарикоподшипников с пластичными смазками, а также с ТСП – Т-900 фтор в вакууме  $10^{-3}$  Па в зависимости от температуры приведены на рис. 3. Подшипники № 6-29ЮТ (9×26×8), нагрузка 1,02 кН, тип движения возвратно-вращательный с частотой  $0,3 \text{ с}^{-1}$ . Ресурс и коэффициенты трения подшипников № 6-60202 ЮТ (15×35×11) с пластичной смазкой НИКА при различных температурах приведены в табл. 12.

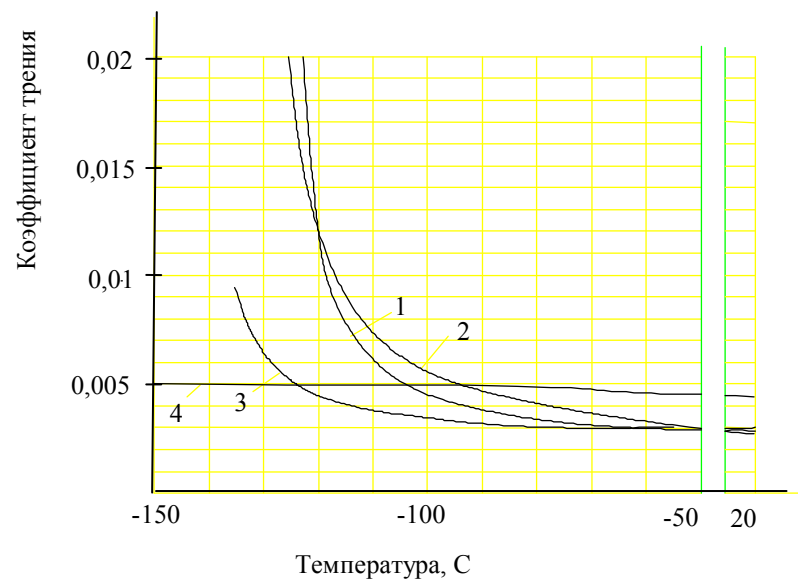


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от температуры подшипников:  
1 – «Аметист»; 2 – НИКА; 3 – «Изумруд»; 4 – твердосмазочное покрытие Т-900 фтор

Т а б л и ц а 12

**Коэффициенты трения подшипников качения со смазкой НИКА  
в зависимости от температуры**

Температура подшипников, °С	Коэффициент трения, $\mu$		Наработка в циклах качаний	Причина прекращения испытаний
	В начале испытаний	В конце испытаний		
190...200	0,0029	0,0095	$5,900 \cdot 10^4$	Множественная наработка требуемого ресурса при допускаемом $\mu$ до 0,3
-130...-110	0,0086	0,0192	$4,590 \cdot 10^4$	
150...165	0,0038	0,01	$1,054 \cdot 10^5$	

В табл. 13 приведены данные по испытаниям трехрядных планетарных редукторов со смазкой «Аметист» в вакууме и разреженном  $\text{CO}_2$  при различных температурах редукторного узла. Материалы зубчатых колес: центральных и саттелитов – композиционный материал С-5Ф, эпицикла – алюминиевый сплав В95Т с твердым анодно-окисным покрытием.

Т а б л и ц а 13

**Результаты испытаний трехрядных планетарных редукторов со смазкой «Аметист»**

Среда и давление среды, Па	Контактные напряжения (центральная шестерня-сателлит), МПа		Скорость скольжения (max) на профилях зубьев, м·с <sup>-1</sup>		Температура редуктора, °С		Длительность работы, ч
	I ряд	III ряд	I ряд	III ряд	max	min	
Вакуум, $10^{-4}$ Па	(5,7..8)·10	(4,3..6)·10 <sup>2</sup>	0,6...1,4	0,02...0,04	200	- 110	500
$\text{CO}_2$ , $10^3$ Па					50	- 110	500

Пусковой момент силы при - 110°C возрастал в два раза, а при - 130°C – в четыре раза по сравнению с его значениями при положительных температурах.

Состояние зубчатых колес и подшипников качения после 500-часовых испытаний редукторов удовлетворительное.

В результате поисковых работ по повышению служебных свойств ПС для пар трения механизмов космической техники значительно расширен низкотемпературный предел применения с - 60...80°C на смазках первого поколения (ВНИИНП-246) до - 110...130°C («Аметист», «Изумруд» и др.). Допускаемые контактные напряжения в зубчатых зацеплениях увеличены до (1...2)·10<sup>3</sup> МПа, ресурс повышен до 500 ч и более.

Несмотря на повышенную испаряемость при температурах выше 100°C по сравнению с кремнийорганическими (ВНИИНП-246) ПФПЭ смазки в парах трения в вакууме и разреженном  $\text{CO}_2$  имеют более высокий ресурс. Это, очевидно, связано с рядом физико-химико-механических процессов на поверхностях трения и образованием на них при приработке вторичных износостойких структур.

### 2.3. Антифрикционные покрытия

К таким покрытиям относятся металлические покрытия (Ag, Au, Ta, Mo и др.), покрытия на основе MoS<sub>2</sub> со связующим и без него, без подложки и с другими покрытиями в качестве подложки (СТМ-1, ВАП-2, фосфатирование с СТМ-1 или ВАП-2, Ag ВАП-2, Mo + MoS<sub>2</sub>), покрытие на основе фторопласта – полифеноаримидная ткань – препрег, оксидированный слой на алюминиевом сплаве В95Т с пропиткой Pb, MoS<sub>2</sub>, фторопластом.

Исследования по оценке работоспособности подшипников скольжения и зубчатых передач из стали 20Х17Н2 с покрытиями Ag и Au проводились применительно к условиям эксплуатации марсианского изделия. Результаты испытаний «всухую» зубчатых пар в экспериментальном редукторе Р-1 представлены в табл. 14.

Существенным недостатком металлических покрытий является ограниченный ресурс. Заметное увеличение работоспособности достигается применением металлических покрытий в сочетании с пластичными смазками или другими видами покрытий. Так, например, шарнирные подшипники ШС30 из стали 95Х18 при испытаниях на стенде В-20 в вакууме в температурном диапазоне от -100 до ±250°С и нагрузках 25...75 МПа показали следующий ресурс: ШС 30 без покрытий – 10 циклов; ШС 30 + Ag – 260 циклов; ШС 30 + Ag + смазка НИРА – 6300 циклов.

Т а б л и ц а 14

#### Результаты испытаний зубчатых пар с металлическими покрытиями в экспериментальном редукторе Р-1

Материал покрытия шестерен толщиной 3...5 мкм	Среда, давление	Температура, °С	Контактные напряжения, МПа	Ресурс	
				мин.	цикл
20Х17Н2 с Au	воздух, 10 <sup>5</sup> Па	20±5	2500	100	7,3·10 <sup>5</sup>
20Х17Н2 с Au	СО <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	20...-48	2500	20	7,3·10 <sup>5</sup>
20Х17Н2 с Ag	воздух, 10 <sup>5</sup> Па	20±5	6900	100	2,3·10 <sup>4</sup>
20Х17Н2 с Ag	СО <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	20...-48	6900	20	2,3·10 <sup>4</sup>

В подшипниках качения Au и Ag наносят на сепараторы и дорожки качения в сочетании с MoS<sub>2</sub> для работы в вакууме «всухую».

Наиболее часто применяются два покрытия на основе MoS<sub>2</sub> (табл. 15).

Т а б л и ц а 15

**Твердосмазочные покрытия на основе MoS<sub>2</sub>**

Покрытие	Состав	Область применения
СТМ-1	Клеи БФ-2 или БФ-4, дисульфид молибдена	Нагруженные зубчатые передачи, подшипники скольжения при работе в вакууме, углекислом газе и на воздухе
ВАП-2	Эпоксидный лак ЭП-074, дисульфид молибдена	Нагруженные узлы скольжения при работе в вакууме, углекислом газе, на воздухе в керосине, масле

Покрытия наносятся на стали, титановые и алюминиевые сплавы, металлокерамические материалы. Существенное влияние на работоспособность покрытий оказывает способ подготовки поверхности. Конструкционные стали и сплавы подвергаются абразивной обработке, фосфатированию, травлению, электроискровому легированию металлами с целью создания необходимой шероховатости поверхности.

Для титана и его сплавов под покрытие СТМ-1 разработано покрытие «никель-фосфор» толщиной (10...25) мкм, в качестве подслоя, а также композиционное покрытие «никель-фосфор» с включением упрочняющих частиц дисперсной фазы карбида кремния (Ni-P-SiC). Результаты испытаний на машине трения УТИ-1В в вакууме, показали, что ресурс покрытия Ni-P-SiC в 68 раз выше, чем у стали 18X2H4MA с азотированной поверхностью. Применение покрытия ВАП-2 на титановых сплавах по подслою, состоящему из электроискрового покрытия Mo и электрохимического Ag, позволяет повысить нагрузку в опорах скольжения до 100 МПа при ресурсе  $1 \cdot 10^5$  циклов. Подобное покрытие на сталях работает при удвоенных нагрузках и значительно увеличенных ресурсах.

В качестве подслоя на алюминиевых сплавах применяют анодноокисное покрытие (анодирование). Это позволило опреде-

лить номенклатуру анодируемых алюминиевых сплавов, повысить точность получения толщины покрытия до (5...10) %, исключить вероятность прижогов, повысить температуру процесса с (0...минус 5)°С до (10...15)°С, увеличить пористость покрытия, что дало возможность заполнять поры твердыми смазочными материалами для придания анодноокисному покрытию свойств антифрикционного.

Результаты трибологических испытаний в вакууме позволили скомплектовать несколько работоспособных пар трения (табл. 16). Испытания проводились на установке УТИ-1В, в вакууме  $5 \cdot 10^{-3}$  Па, при скорости скольжения 0,5 м/с, на пути трения 1000 м. Диаметр шарика 4,5 мм, твердость 60 HRC.

Т а б л и ц а 16

**Состав и характеристики покрытий в парах трения скольжения**

Покрытие на кольце	Покрытие на инденторе	Износ кольца / индентора, г	Коэффициент сухого трения
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – MoS <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – MoS <sub>2</sub>	0,0137 / 0	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – PTFE – MoS <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – PTFE – MoS <sub>2</sub>	0,0393 / 0,0040	0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – MoS <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0156 / 0	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – MoS <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Pb	0 / 0	0,08 – 0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Pb	сталь 3Х13	0 / 0	0,025 – 0,08

В табл. 17 приведены данные по испытаниям трехрядного планетарного редуктора в вакууме. Материалы зубчатых колес: центральных и сателлитов – С-5Ф с покрытием СТМ-1, эпицикла – В95Т с твердым анодноокисным покрытием.

Высокоточная опора скольжения из алюминиевого сплава В95Т + Ан.окс.тв.+ Pb по валу из одноименного материала В95Т + Ан.окс.тв. + СТМ-1 датчика угла поворота привода изделия для орбитальной станции сохранила работоспособность после наработки заданного ресурса  $1,44 \cdot 10^6$  циклов качаний в режиме возвратно-вращательного движения в вакууме  $10^{-4}$  Па в температурном диапазоне от - 60 до 60 °С.

Т а б л и ц а 17

**Результаты испытаний трехрядного планетарного редуктора  
с покрытием СТМ-1 в вакууме  $10^{-4}$  Па**

Контактные напряжения, МПа	Скорость скольжения на профилях зубьев, м·с <sup>-1</sup>	Температура редуктора, °С	Длительность работы, ч
300...700	0,12...1,5	-50...200	200

Известен химико-термический способ получения дисульфидмолибденового покрытия на стальных и титановых поверхностях нанесением молибденового слоя на рабочую поверхность с последующим сульфидированием с образованием MoS<sub>2</sub>. Процесс ведется при температуре 750 °С. Покрытие наносится на жаропрочные материалы. В качестве титанового сплава был выбран жаропрочный сплав ТС-5.

В табл. 18 представлены результаты исследований на различных стендах.

Т а б л и ц а 18

**Антифрикционные свойства покрытия MoS<sub>2</sub> диффузионного типа**

Стенд	Материалы пары трения	Среда	Скорость скольжения, м/с	Нагрузка	Ресурс в циклах, часах, км пути трения	Кoeffициент трения
УТИ-1В	Кольцо из титанового сплава ТС-5+MoS <sub>2</sub> , сферический индентор из стали ШХ15 HRC60	Вакуум, $1 \cdot 10^{-3}$ Па	0,50	25 Н, 1720 МПа	142 час $1,37 \cdot 10^6$ цикл 256 км	0,12...0,03
МФТ-1В	Две втулки из ТС-5+MoS <sub>2</sub>	Вакуум, $1 \cdot 10^{-3}$ Па	0,08	12,5 МПа	33,5 час 9,65 км	0,11...0,06
В-20	Втулки – молибденовый сплав ЦСДМ + MoS <sub>2</sub> , вал – титановый сплав ВТ14 с азотированием	СО <sub>2</sub> - $10^3$ Па	0,10	30 МПа	13,4 час 4,9 км	0,07...0,05
В-24	Ролики из ТС-5 + MoS <sub>2</sub>	Вакуум, $1 \cdot 10^{-3}$ Па	0,20	254 Н, 300 МПа	40 час $6 \cdot 10^3$ цикл	0,07...0,05

В парах трения скольжения при невысоких скоростях скольжения в качестве покрытия успешно применяется полифеноаримидная ткань. Технология ее нанесения включает подготовку поверхности, нанесение клея, раскрой ткани, приклеивание с последующей опрессовкой и термостатированием.

Испытания показали, что опоры скольжения с тканевым покрытием работоспособны в условиях воздействия влажности, вакуума и различных газовых сред, ударных и вибрационных нагрузок в температурном диапазоне от - 196 до 250 °С при нагрузках до 200 МПа. Так, при испытаниях на стенде В-20 шарнирный подшипник с тканевым покрытием типоразмера ШС30 отработал без существенного износа в режиме возвратно-вращательного движения в вакууме  $10^{-4}$  Па. в температурном диапазоне от - 100 до  $\pm 250$  °С при нагрузке (25...75) МПа  $2 \cdot 10^5$  циклов. При испытаниях на стенде В-50 цилиндрические опоры возвратно-поступательного движения отработали на воздухе в температурном диапазоне от - 50 до 50 °С при нагрузке 1 МПа и скорости скольжения 0,28 м/с  $1,48 \cdot 10^7$  циклов.

## 2.4. Самосмазывающиеся материалы

*Самосмазывающиеся материалы на полимерной основе* (табл. 19).

Т а б л и ц а 19

### Основные физико-механические характеристики самосмазывающихся материалов на полимерной основе

Наименование показателей	Наименование материалов				
	ФН-202	ДАК-8	ПАМ 15-67	ПКМ-1	
Полимерная основа	Фторопласт-4	Поликарбонат марки Дифлон	Полиамид ПМ-67	Полифенилен-оксид	
Антифрикционные и металлические добавки	Дисульфид молибдена и порошкообразный никель	Фторопласт-4	Графит	Фторопласт-4	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,2...2,5	1,2	1,4	1,4	
Предел прочности, МПа	При сжатии	35...50	70...80	200...230	70...90
	При изгибе	-	80...100	150...180	70...130



Окончание табл. 19

Наименование показателей	Наименование материалов			
	ФН-202	ДАК-8	ПАМ 15-67	ПКМ-1
Модуль упругости, МПа	-	$2,9 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$
Температурный диапазон применения, °С	-150...200	-250...120	-150...200	-175...175
Назначение	Детали скольжения, сепараторы подшипников качения	Детали скольжения и малонагруженные зубчатые колеса	Зубчатые колеса и детали скольжения	

Из рассмотренных полимерных материалов в паре с алюминиевым сплавом В95Т с покрытием Ан.окс.тв. наименьший износ в среде  $\text{CO}_2$  имели шестерни из ПКМ-1 (табл. 20). Материал ПАМ15-67 имеет удовлетворительную износостойкость в вакууме и среде  $\text{CO}_2$ .

Т а б л и ц а 20

**Удельный линейный износ зубьев шестерен при контактных напряжениях 35 МПа, частотах вращения -  $10 \dots 60 \text{ с}^{-1}$  в температурном диапазоне  $\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$**

Полимерный материал	Среда, давление среды, Па	Наработка		Удельный линейный износ зубьев, мм/цикл	Состояние зубчатых колес
		Часы	Циклы нагружений		
ПАМ15-67	Вакуум, $10^{-3}$	317,0	$4,2 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	Удовлетворительное
ПАМ15-67	$\text{CO}_2$ , $1,3 \cdot 10^3$	76,5	$8,3 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	
ПКМ-1	$\text{CO}_2$ , $1,3 \cdot 10^3$	145,0	$2,0 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^{-9}$	
ДАК-8*	$\text{CO}_2$ , $1,3 \cdot 10^3$	15,0	$3,0 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	

\* Контактные напряжения – 20 МПа.

На рис. 4 приведены характеристики выносливости при изгибе некоторых полимерных материалов, полученные при испытаниях в металлополимерных парах: на зубчатых колесах и на плоских образцах.

Основные данные по термовакuumным испытаниям двух трехступенчатых планетарных редукторов с металлополимерными зубчатыми парами в различных средах приведены в табл. 21.

Момент на выходном валу силы редуктора – 13 Н·м.

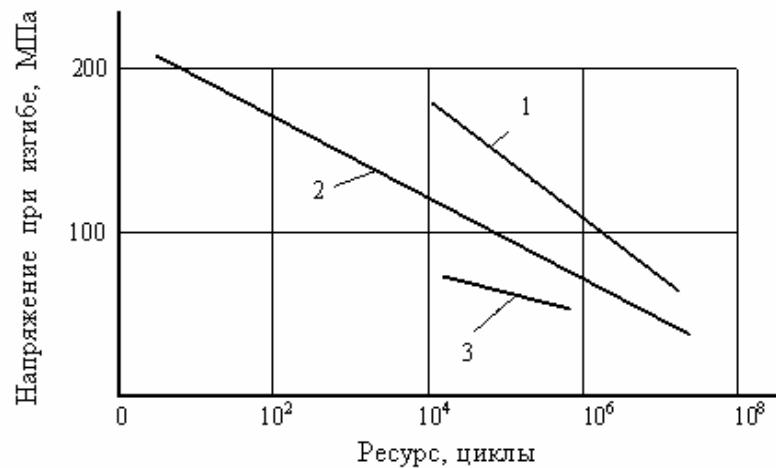


Рис. 4. Выносливость при изгибе полимерных материалов в зубчатых колесах: 1 – ПАМ 15-67; 2 – ПКМ-1; 3 – ДАК-8

Т а б л и ц а 21

**Результаты испытаний трехступенчатых планетарных редукторов с металлополимерными зубчатыми парами**

Наименование параметров		1 ряд	2 ряд	3 ряд
Материалы зубчатых пар	Центральные	В95Т Ан.окс.тв.	В95Т Ан.окс.тв.	С5-Ф
	Сателлиты	ПАМ15-67	ПАМ15-67	С5-Ф
	Эпицикл	В95Т Ан.окс.тв.		
Контактные напряжения, МПа		32,5	80	700
Изгибные напряжения в зубьях полимерных колес, МПа		6	26	75
Частота вращения сателлитов, с <sup>-1</sup>		15...30	2,5...5,0	0,4...0,8
Температура редуктора, °С	СО <sub>2</sub> , 1,3 · 10 <sup>3</sup> Па	-30...100 – при работе -100...30 – на стоянке		
	Вакуум, 10 <sup>-4</sup> Па	-50...200 – при работе -150...150 – на стоянке		
Длительность испытаний	СО <sub>2</sub> , 1,3 · 10 <sup>3</sup> Па	400 ч работы и 615 ч пребывания		
	Вакуум, 10 <sup>-4</sup> Па	300 ч работы и 340 ч пребывания		

Редуктор перед термовакуумными испытаниями проходил вибрационные, ударные и динамические испытания в атмосферных условиях. Вибрационные – при перегрузках 1...12 g, ударные – до 15 g ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ).

**Самосмазывающиеся материалы на металлической основе** (табл. 22).

Самосмазываемость их при трении проявляется за счет разности коэффициентов термического расширения материала основы и твердой смазки (табл. 22). Поверхность трения подшипников из материала Х18Н9Т/ПСр 40 представляет собой чередующиеся участки стали и сплава ПСр 40. При этом сталь выполняет роль несущей основы, а медно-серебряный сплав ПСр 40 – твердой смазки. Для обеспечения самосмазываемости пазы должны быть направлены перпендикулярно направлению скольжения.

Материал БрФГ-50 подобен металлофторопластовому материалу товарной марки MFV (metalfuoroplast blend), но получен методами порошковой металлургии. В материале Бр.МцФС5-1-20 легированная марганцем и фосфором медь выполняет роль несущей основы, а равномерно распределенные по объему частицы свинца сферической формы являются смазкой.

Т а б л и ц а 22

**Некоторые физико-механические характеристики материалов для самосмазывающихся узлов трения скольжения**

Материал	X18Н9Т/ПСр.40	БрФГ-50	БрМцФС5-1-20
	Состав		
Характеристики	сталь Х18Н9Т со сплавом ПСр.40 в пазах	Двухслойная бронза состава Бр.010 с рабочим слоем пористостью 40%, пропитанная фторопластом-4 (50%) с графитом (50%)	Литая бронза состава: марганец – 4,5%; фосфор – 1,35%; свинец – 20...23%; медь – остальное.
Твердость, НВ	130/85	50/6	85...90
Предел прочности при сжатии, МПа	880/540	400/100	550

Окончание табл. 22

Материал	X18H9T/ПСр.40	БрФГ-50	БрМцФС-1-20
	Состав		
Предел прочности на срез, МПа	520/225	250/50...90	200...250
Ударная вязкость, кгс·м/см <sup>2</sup> (Дж/см <sup>2</sup> )	10/4 (98/39,2)	0,7/0,2...0,3 (6,9/1,9...2,9)	1,1...1,2 (10,8...11,8)
Коэффициент термического расширения	$\frac{12,0 \cdot 10^{-6}}{17,0 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{8,0 \cdot 10^{-6}}{8,0 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{15,1 \cdot 10^{-6}}{29,3 \cdot 10^{-6}}$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,8 / 8,4	8,7 / 5,35	9,36
Вид обработки рабочей поверхности	Точение, притирка	Калибрование	Точение
Применение (назначение)	Втулка подшипника скольжения, направляющие (трубка для троса), фрикционные диски	Втулки	Втулки, гайки винтовых механизмов

Примечание. Значение в числителе относится к материалу основы, в знаменателе – к материалу твердой смазки.

Подшипники скольжения из этих материалов были испытаны на стендах В-20 и В-20В в паре с валами из титанового сплава ВТ14 с азотированной рабочей поверхностью в режиме вращательного и возвратно-вращательного движений в широком диапазоне нагрузок, температур и скоростей применительно к условиям эксплуатации на Луне и Марсе. Эксплуатационные характеристики материалов, выявленные в процессе этих испытаний, представлены в табл. 23.

Для обеспечения работоспособности подшипников скольжения из материалов X18H9T/ПСр-40 и БрМцФС-5-1-20 на воздухе можно применить пластичную смазку, которая не влияет на эксплуатационные характеристики БрМцФС-5-1-20 в среде CO<sub>2</sub> и X18H9T/ПСр-40 в среде CO<sub>2</sub> и в вакууме.

**Эксплуатационные характеристики подшипников скольжения  
из самосмазывающихся материалов в паре с валами из титанового  
сплава ВТ14 с азотированной поверхностью**

Параметр		Материал		
		X18H9T/ПСр.40	БрФГ-50	БрМцФС-5-1-20
Ваку- ум, $10^{-4}$ Па	Коэффициент тре- ния	0,22...0,27	0,10...0,18	
	Радиальный износ, мкм/км	5...20	40...70	
	Допустимая нагруз- ка, МПа	30	10	
	Допустимая ско- рость скольжения, м/с	0,5	0,5	
	Рабочая температу- ра, °С	-150...250	-150...200	
СО <sub>2</sub> , $1,3 \cdot 10^3$ Па	Коэффициент трения		0,11...0,17	0,08...0,18
	Радиальный износ, мкм/км		30...55	10...60
	Допустимая нагруз- ка, МПа		10	36
	Допустимая ско- рость скольжения, м/с		0,5	0,5
	Рабочая температу- ра, °С		-150...200	-150...150
Воздух, $10^5$ Па	Коэффициент трения	0,35	0,10...0,15	0,40
	Радиальный износ, мкм/км	250	25...45	500
	Допустимая нагруз- ка, МПа	6	10	36
	Допустимая ско- рость скольжения, м/с	0,1	0,5	0,5
	Рабочая температу- ра, °С	20...130	20...200	20...150

## 2.5. Поверхностно-активные вещества

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) предназначены для образования на поверхностях трения твердосмазочных антифрикционных покрытий.

Фторированный углерод Т-900 – тонкодисперсный порошок с массовой долей фтора (40...63)%. Для получения антифрикционного покрытия детали (шестерни, подшипники качения и скольжения) прирабатываются в течение 30 мин при постепенном увеличении нагрузки от 10% до 100% от номинальной в смеси порошка фторуглерода в дизельном топливе (20% по массе).

Поверхностно-активные вещества, относящиеся к группе эпиламов, ПАВ-ЭЛАМ, ПАВ № 6-1 и № 9-1, представляют собой пастообразные массы с вязкостью около 400 сСт. Покрытие наносится кипячением деталей в течение 30 мин в растворе ПАВ (3 % массовых) в хладоне-113 или в изопропиловом спирте. Применение ультразвука сокращает время нанесения их на поверхности деталей из раствора до 1 мин. Эффективным оказался метод приработки деталей в течение 30 мин при постепенном увеличении нагрузки от 10% до 100% от номинальной в растворе ПАВ (0,5% массовых) в моторном масле.

ПАВы, разработанные в Российском научном центре «Прикладная химия» (РНЦ ПХ):

ПАВ-ЭЛАМ – диэтанол амида перфторполипропиленоксида с массовым числом 2500;

ПАВ №6-1 и ПАВ №9-1 – полиоксиэтилированный перфторполипропиленоксид с числом этиленоксидных звеньев равным соответственно 14 и 25;

ПАВ МФК-180 – перфторполипропиленоксидкарбоновая кислота.

Металлографические и трибологические исследования, проведенные в РНЦ ПХ, показали, что обработка поверхностей в растворах ПАВ приводит к образованию на поверхности деталей пленки толщиной  $(3...6) \cdot 10^{-3}$  мкм, способствующей удержанию смазки в зоне контакта, снижению износа и потерь на трение.

Влияние приработки в дизельном топливе с добавкой фторированного углерода Т-900 на коэффициент трения пары «цилиндр – плоскость» представлено в табл. 24. Испытания проводились на машине трения В-3.



Т а б л и ц а 24

## Условия и результаты испытаний на образцах

Плоский образец			Ролики		Контактное напряжение, МПа	Скорость скольжения, м·с <sup>-1</sup>	Среда, давление среды	Коэффициент трения	Наработка		
Материал	Покрытие		Материал	Покрытие					Часы	Минуты	Циклы нагружений плоского образца
	1-й слой	2-й слой									
Ал. сплав В95Т	Т-900	-	Сталь 20Х17Н2 HRC 33	Т-900	254	0,4	СО <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	0,10	3	30	5,7·10 <sup>5</sup>
Ал. сплав В95Т	Ан. окс.тв.	СТМ1	Сталь 20Х17Н2 HRC 33	-	254	0,4	СО <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	0,05	18	40	3,0·10 <sup>6</sup>
Ал. сплав В95Т	Ан. окс.тв.	Т-900	Сталь 20Х17Н2 HRC 33	Т-900	254	0,4	СО <sub>2</sub> , 10 <sup>3</sup> Па	0,10	102	50	1,6·10 <sup>7</sup>
Сталь 20Х17Н2	Т-900	-	Сталь 20Х17Н2 HRC 33	Т-900	550	0,4	Воздух, 10 <sup>5</sup> Па	0,18	14	40	2,4·10 <sup>6</sup>





Как следует из табл. 24, наибольший эффект создается в сочетании оксидирования с обработкой ПАВ образцов из алюминиевого сплава В-95 Т (ресурс 102 ч 50'). Замена ПАВ на покрытие СТМ-1 на алюминиевых образцах приводит к существенному сокращению ресурса (18 ч 40'), а применение ПАВ без оксидирования алюминиевых образцов к еще большему (3ч 30').

Результаты испытаний подшипников качения, обработанных составом Т-900, в сравнении с подшипниками с пластичными смазками иллюстрирует рис. 3. Преимущества ПАВ наглядно проявляются при отрицательных температурах ниже - 120°С, при которых подшипники со смазками оказываются неработоспособными.

Результаты испытаний пары трения с ПАВ, нанесенными приработкой их в суспензии с минеральным маслом на детали «плоский образец-ролик», представлены в табл. 25. (Испытания проводились на машине трения при контактных напряжениях 254 МПа и скорости скольжения 0,4 м/с на воздухе. Плоский образец изготовлен из алюминиевого сплава В-95Т, ролики – из стали 20Х17Н2 HRC35).

Т а б л и ц а 25

**Результаты испытаний различных ПАВ в паре «плоскость-цилиндр»**

ПАВ	Наработка, час, мин	Коэффициент трения		Линейный износ, мкм	Удельный линейный износ плоского образца, мкм/цикл	Состояние поверхности плоского образца
		В начале испытаний	В конце испытаний			
ПАВ 9-1	60'	0,07	0,16	40	$7,5 \cdot 10^{-4}$	Поверхность волнистая
ПАВ 6-1	5 ч 40'	0,05	0,05	10	$3,2 \cdot 10^{-5}$	Поверхность гладкая
ЭЛАМ 3 %	1 ч 05'	0,06	0,16	30	$5,1 \cdot 10^{-4}$	Поверхность волнистая

Влияние ПАВ-МФК-180 на работоспособность пары трения скольжения со смазкой «Аметист» исследовалось на стенде В-20 В в режиме вращательного движения. Втулка из стали 18Х2Н4МА, HRC<sub>3</sub>, 42 с чистой поверхности  $\sqrt{0,63}$  в паре с валом из стали 95Х18, HRC<sub>3</sub>, 36...38 с чистой поверхности  $\sqrt{1,25}$  проходила ресурсные испытания при скорости скольжения 2 см/с и удельной нагрузке 5,8 МПа.

Испытаниям подвергались втулки с покрытием Zn, с покрытием Zn и обработкой кипячением в растворе ПАВ, а также без покрытий. Валы испытывались без покрытий. Перед испытаниями валы и втулки смазывались тонким слоем пластичной смазки «Аметист». Результаты испытаний представлены в табл. 26.

Т а б л и ц а 26

**Условия и результаты испытаний пары «вал-втулка» с пластичной смазкой «Аметист»**

№ испытания	Покрытие втулок	Температура, °С	Давление воздуха, Па	Путь трения, м	Коэффициент трения	Состояние поверхности трения
1	Цинк	20 20 - 30	$10^5$ $10^{-4}$ $10^{-4}$	41,5 69,0 69,0	0,13...0,10 0,13...0,27 0,23...0,46	В зонах трения подшипников и вала наблюдаются риски. Цинк частично снят.
2	Цинк + ПАВ МФК-180	20 20 - 30	$10^5$ $10^{-4}$ $10^{-4}$	41,5 69,0 69,0	0,10 0,12 0,10...0,12	Зоны трения подшипников и вала гладкие. Слой цинка не нарушен. Чистота поверхности втулок в зоне трения повысилась с $\sqrt{0,63}$ до $\sqrt{0,16}$
3	ПАВ МФК-180	20 20 - 30	$10^5$ $10^{-4}$ $10^{-4}$	41,5 69,0 69,0	0,21 0,19...0,08 0,09	Зоны трения подшипников и вала гладкие. Чистота поверхности втулок в зоне трения повысилась с $\sqrt{0,63}$ до $\sqrt{0,16}$
4	Без покрытия	20 20 - 30	$10^5$ $10^{-4}$ $10^{-4}$	41,5 69,0 69,0	0,12 0,10...0,28 0,28	В зонах трения подшипников и вала следы схватывания, риски

Испытания показали, что обработка ПАВ МФК-180 поверхностей пары «вал-втулка» и смазка «Аметист» обеспечивают заданный ресурс пары на воздухе с переходом в вакуум, без обработки ПАВ «Аметист» не обеспечивает заданный ресурс.

Также исследовалось влияние ПАВ МФК-180 на работоспособность микроэлектродвигателей. Обработка кипячением в растворе ПАВ щеток и подшипников повысила ресурс микроэлектродвигателя в вакууме при температуре - (160...170)°С с 1 ч 10' до 8 ч 20'.

## 2.6. Магнитопорошковые смазки

Один из перспективных путей эффективного повышения ресурса сухих зубчатых передач – применение магнитоактивных порошкообразных твердых смазок в сочетании с магнитным способом их подачи в зону трения.

Сущность способа состоит в том, что диамагнитным порошкообразным смазкам, например  $\text{MoS}_2$ , придаются магнитные свойства путем введения в них определенного количества ферромагнитного вещества. Детали трения (шестерни) изготавливаются из магнитного материала, а весь узел трения размещают в магнитном поле таким образом, чтобы шестерни, смазка и магнит образовали единый магнитный контур.

Перспективность магнитопорошкового способа смазки определяется возможностью повысить ресурс механизмов за счет увеличения объема смазки, циркулирующей в узле трения в процессе его работы, лучшего удержания смазки на поверхности трения и возможности многократной подачи одних и тех же частиц смазки в зону трения.

Работы, проведенные НИИ Машиноведения РАН, были выполнены для узлов сухого трения, эксплуатируемых в нормальных атмосферных условиях. Однако для вакуума и  $\text{CO}_2$  такие данные отсутствовали, их не было как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Это и предопределило необходимость проведения комплекса научно-исследовательских работ, которые позволили:

- 1) дать принципиальную оценку возможности использования магнитопорошковой смазки с магнитным способом ее подачи в условиях вакуума и  $\text{CO}_2$ ;

2) изыскать и исследовать новые смазочные композиции с целью дальнейшего повышения эффективности магнитного метода;

3) исследовать работоспособность редукторных узлов с магнитным способом подачи смазки, определить их предельные нагрузочные и ресурсные возможности.

Эти работы проводились ВНИИТРАНСМАШ совместно с НИИ Машиноведения РАН и Институтом проблем материаловедения АН Украины.

Возможность использования магнитопорошкового способа смазки в вакууме и  $\text{CO}_2$  оценивалась в экспериментальном редукторе Р-1 с магнитом и шестернями из материала С-5Ф с твердостью  $\text{HRC} \geq 56$  и с магнитоактивной смазкой на основе  $\text{MoS}_2$  и Ni (рис. 5). Для сравнения испытания проводились также на воздухе.

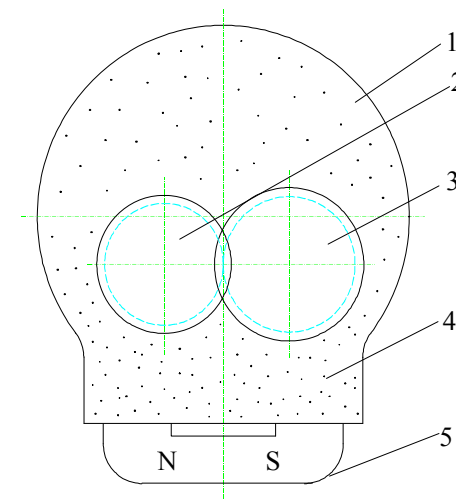


Рис. 5. Схема экспериментального редуктора Р-1 с магнитом и магнитоактивной смазкой: 1 – корпус; 2 – блок-шестерня; 3 – шестерни; 4 – магнитоактивная смазка; 5 – магнит

Во время испытаний во всех средах наблюдалась устойчивая циркуляция смазки в зубчатых колесах. Осмотр шестерен после 100 ч работы во всех средах показал, что на рабочих поверхностях зубьев образовалась пленка смазки, а через 500 ч пленка со-

хранилась, причем весовой износ зубьев был незначителен, однако в  $\text{CO}_2$  он был несколько выше, чем в вакууме, но ниже, чем на воздухе. Исследования показали, что КПД зубчатой пары достаточно высок, величина его практически не менялась в течение всего цикла испытаний и мало зависела от среды.

При изыскании новых смазочных композиций выбор исходных компонентов смазок проводился с учетом их магнитных и антифрикционных свойств, долевого соотношения, физико-химической совместимости, размера частиц компонента и геометрических параметров зубчатого зацепления. В качестве твердосмазочной составляющей был выбран дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$  (в ряде опытов использовался  $\text{MoSe}_2$ ). Ферромагнитным наполнителем являлась группа ферромагнитных материалов ( $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$ ), сохраняющих свои служебные свойства при температуре  $300\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ , используемых как в чистом виде, так и с поверхностью частиц, защищенной (лиофилизированной), с целью предохранения от окисления и улучшения антифрикционных свойств, полимерной пленкой олигомера поликапроамида (ОПКА) или полихлордифторэтилена (32 L) или поверхностно-активными веществами (ПАВ) – фторопласта Ф4Д или  $\text{MoS}_2$ . Размер частиц смазки составлял  $(4\text{...}10)$  мкм.

Магнитные характеристики смазок исследовались баллистическим способом по стандартной методике. Магнитная проницаемость ( $\mu$ ) материалов определялась в зависимости от состава и долевого соотношения компонентов. Было показано, что с увеличением количества ферромагнетика магнитные свойства повышаются, однако при этом смазочные свойства могут ухудшиться.

Определяющим является количество ферромагнетика в смазке, которое учитывается коэффициентом объемного наполнения

$$P_\phi = \frac{V_\phi}{V_\phi + V_c}, \quad (12)$$

где  $V_\phi$  и  $V_c$  – объемные доли ферромагнетика и смазочного компонента в смеси. Поэтому создание магнитоактивной порошкообразной смазки предполагает поиск оптимального соотношения между исходными веществами, когда при удовлетворительных магнитных свойствах не происходит существенного ухудшения антифрикционных характеристик (рис. 6).

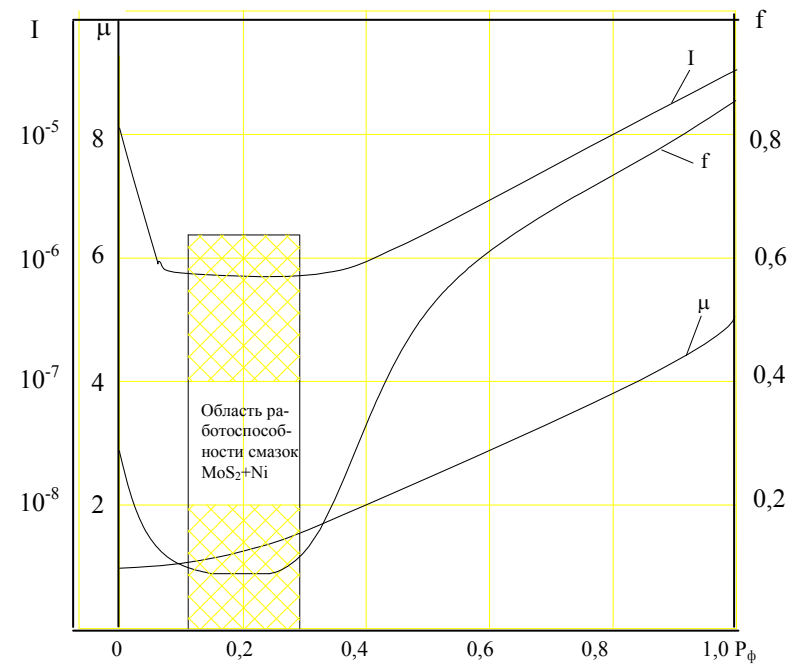


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения скольжения ( $f$ ), интенсивности изнашивания ( $I$ ) и магнитной проницаемости ( $\mu$ ) от коэффициента объемного наполнения ( $P_\phi$ ) для смазки  $\text{MoS}_2 + \text{Ni}$ .

Из рис.6 видно, что для смазки на основе  $\text{MoS}_2$  и  $\text{Ni}$  с роликовой парой трения из стали 3X13, HRC 30 оптимальное значение  $R_\phi$  находится в пределах от 0,08 до 0,32.

Антифрикционные характеристики различных смазок исследовались на роликах из стали 3X13, HRC 30...45 и зубчатых колесах, выполненных из сталей 3X13, ХВГ, 12ХН3А и спеченных железостеклянных материалов С-5Ф и КЖ-4Ф, HRC 45...62 (на стендах НИИ Машиноведения РАН, В-6М и экспериментальном редукторе Р-1 – рис. 7). Установлено, что наилучшими антифрикционными и износными свойствами обладают смазки на основе  $\text{MoS}_2$  с ферритом лития. У смазки  $[\text{MoS}_2 + \text{Li}_{0,5} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4]$  оптимум антифрикционных и магнитных свойств находится при

соотношении компонентов в пределах  $P_{\phi}$  от 0,04 до 0,35. С ростом контактных давлений от 100 до 710 МПа и скоростей скольжения от 0,5 до 3 м/с коэффициент трения снижается для смазки  $[\text{MoS}_2 + \text{Li}_{0,25} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4]$  от 0,1 до 0,04.

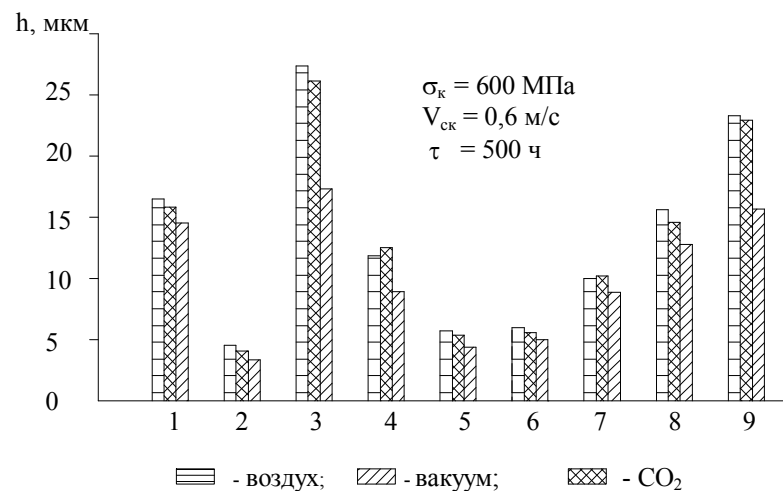


Рис. 7. Суммарный износ зубьев ( $h$ ) блок-шестерни и колеса из материала С-5Ф редуктора Р-1 при работе с магнитоактивными смазками на основе  $\text{MoS}_2$  с ферромагнетиками в различных средах: 1 – Ni; 2 –  $\text{Li}_{0,5} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4$ ; 3 – Fe; 4 – Co; 5 – Co + 32L; 6 – Co + ОПКА; 7 – Co +  $\text{MoS}_2$ ; 8 – Fe + ОПКА; 9 – FeO + Ф4Д; ОПКА – олигомер поликапроамида, 32L – полихлордифторэтилен, Ф4Д – фторопласт Ф4 в жидком состоянии

Влияние среды на износ и КПД зубчатой пары для указанной смазки незначительно, при этом КПД был в пределах 0,98...0,96.

Работоспособность зубчатых передач с выбранными смазками  $[\text{MoS}_2 + \text{Li}_{0,25} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4]$  и  $[\text{MoS}_2 + (97\% \text{Co} + 3\% 32 \text{L})]$  проверялась как в зубчатых парах, так и в планетарных редукторах в вакууме  $10^{-4}$  Па, в  $\text{CO}_2$  при давлении 0,65 кПа и на воздухе.

В зубчатых парах исследовались характер и закономерность изнашивания зубьев колес, зависимость износа от величины нагружения и определялись допустимые предельные контактные давления в зацеплении ( $\sigma_k = 600 \dots 2800$  МПа, материал шестерен сталь 12ХНЗА, HRC  $\geq 56$ ).

Изучение процесса формирования зоны контакта в зацеплении при использовании магнито-порошковой смазки позволило



установить, что при работе шестерен зона контакта во много раз превышает размеры площади контакта, рассчитанной по формуле Герца. Образующие слои смазки могут выдерживать большие контактные нагрузки. Экспериментально установлено, что для каждой смазки имеются определенные предельные контактные давления ( $\sigma_k$ ), превышение которых приводит к разрушению экранирующей пленки смазки, контакту металлических поверхностей, катастрофическому износу зубьев и потере работоспособности зубчатой передачи.

Для передачи, где использовались смазки  $[\text{MoS}_2 + \text{Li}_{0,5} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4]$  (4:1), предельное значение  $\sigma_k = 2500$  МПа, у смазки  $[\text{MoS}_2 + (97\% \text{Co} + 3\% \text{«32L»})]$  (4:1)  $\sigma_k = 2000$  МПа.

Исследование работоспособности планетарного редуктора включало в себя определение ресурсных возможностей и КПД редуктора.

Ресурсные испытания пяти планетарных редукторов с отобранными смазками проводились в вакууме при температурах от -130 до 250 °С, в  $\text{CO}_2$  – от -130 до 130 °С и на воздухе при нормальных атмосферных условиях. Центральные шестерни и сателлиты были выполнены из материала С-5Ф, HRC 42...53, а эпицикл – из алюминиевого сплава В-95Т с твердым анодно-окисным упрочнением поверхности зубьев,  $\text{HV} \geq 500$  или из титанового сплава ВТ-14 с азотированной поверхностью зубьев.

За время испытаний все редукторы наработали по 800 ч и после этого продолжали оставаться в работоспособном состоянии. КПД редукторов (при  $M_{вх} = \text{const}$ ) практически не изменялся, с увеличением момента возрастал и в зависимости от уровня нагрузки варьировался от 0,75 до 0,89.

По результатам проведенных исследований был разработан для привода мотор-колеса перспективной транспортной машины планетарный редуктор с магнитопорошковым способом смазки.

Исследования показали, что применение магнитоактивных порошкообразных смазок на основе  $\text{MoS}_2$  с ферритом лития позволяет повысить работоспособность тяжелонагруженных зубчатых передач в вакууме, разреженном  $\text{CO}_2$ , и на воздухе в 2,5 – 4 раза по сравнению с работоспособностью, полученной при работе со смазкой на основе  $\text{MoS}_2$  с Ni.

## 2.7. Материалы для ядерных космических энергоустановок

В данном разделе представлены технические решения и результаты испытаний узлов трения приводов регулирования ядерных космических энергоустановок (ЯКЭУ), разработанных Государственным предприятием “Красная звезда”. Отличительными особенностями условий эксплуатации узлов трения ЯКЭУ являются высокие температуры, воздействие мощных радиационных потоков, длительные ресурсы при условии высокой надежности систем управления. К усложняющим особенностям относятся возвратно-поступательный характер перемещений с малыми амплитудами: доли миллиметра – для прямолинейного движения и доли градуса поворота – для вращающихся элементов, что способствует местному износу деталей пар трения, истираемости покрытий и смазок и диффузионному сцеплению контактирующих поверхностей.

Схемы основных узлов трения представлены на рис. 8 – 10, материалы пар трения и рекомендации по обеспечению работоспособности – в табл. 27, условия и результаты испытаний пар трения и изделий – в табл. 28 – 30.

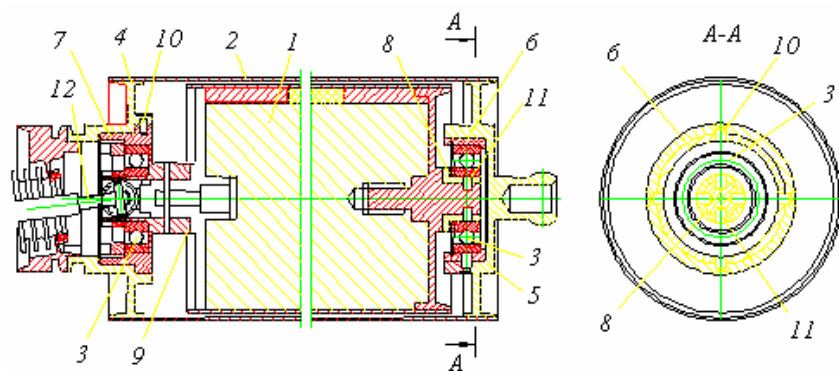


Рис. 8. Барабан в корпусе: 1 – барабан; 2 – корпус; 3 – подшипник; 4, 5 – крышка; 6, 7 – втулка наружная; 8, 9 – втулка внутренняя; 10, 11 – шрифт радиальный; 12 – карданный вал

Для поворотных опор органов регулирования использован подшипник качения  $\varnothing 17 \times \varnothing 35 \times 8$  мм (рис. 8). Кольца и шарики изготавливались из жаропрочного металлокерамического твердого сплава 308 на основе карбидов титана и ниобия с никельмолибденовой связкой, сепараторы – из сплава ХН78Т. Предварительные отборочные испытания проходили подшипники трех типов: без покрытий беговых дорожек, с покрытием дисульфидом молибдена (методом натирания), с покрытием из мягких металлов (медь, серебро).

В условиях испытаний (малые нагрузки, малые скорости) минимальные потери на трение оказались у “сухих” подшипников. Для них коэффициент трения составлял 0,001...0,002, для подшипников с покрытиями – 0,003...0,010.

Узлы трения стержневых органов регулирования включают упоры со сферическими головками радиусом 15 мм, линейно перемещающимися относительно цилиндрической поверхности корпуса (рис. 9). Для предотвращения диффузионного схватывания и улучшения антифрикционных свойств сферическая поверхность упоров из жаропрочного сплава ВЖЛ-2 подвергается электроискровому легированию молибденом и серой с образованием износостойкого покрытия типа  $\text{MoS}_2$ . Затем на упоры дополнительно наносится твердосмазочное покрытие ВАП-2, которое обеспечивает ресурс наземных стендовых испытаний, а электроискровое покрытие – ресурс работы в условиях космоса.

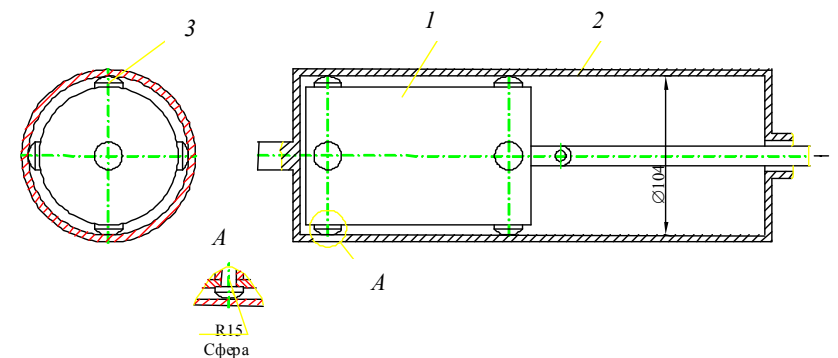


Рис. 9. Стержень в корпусе: 1 – стержень; 2 – корпус; 3 – упор

На цилиндрическую поверхность корпуса из сплава ЭП 126, по которой происходит движение упоров, наносится слой  $\text{MoS}_2$  методом втирания до получения покрытия темно-синего цвета.

Ресурс шестерен из стали 12Х18НВ2 был обеспечен азотированием поверхностей зубьев и твердосмазочным покрытием ВНИИ НП-213 на основе  $\text{MoS}_2$ , работоспособность опор валов – подшипниками качения 20×37×9 мм из стали 95Х18 без смазки.

Парами трения скольжения карданной передачи являются торцевые и сферические поверхности “сухаря” по пазам на ведущем и ведомом валах, а также цилиндрические поверхности осей по отверстиям в “сухарях” (рис. 10). “Сухари” и оси выполнены из жаропрочного сплава ХН35ВТЮ-ВД с полировкой и покрытием никелем трущихся поверхностей, ведущие валы – из стали 13Х11Н2ВМФ-Ш с упрочнением поверхности до HRC, 32...41. Работоспособность пар трения обеспечивалась “всухую”. Результаты испытаний пар трения в составе тепловых макетов, наземных натуральных энергетических испытаний и космических натуральных испытаний энергоустановок показали, что ресурс изделия более чем в два раза превышает назначенный техническим заданием.

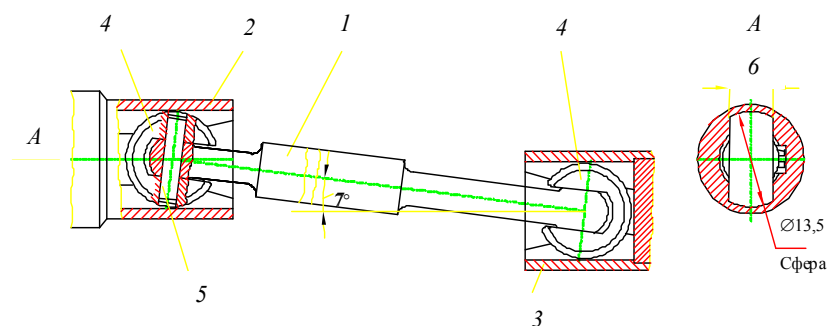


Рис. 10. Карданное соединение: 1 – вал карданный; 2 – вал ведущий; 3 – вал ведомый; 4 – сухарь; 5 – ось

Т а б л и ц а 27

## Пары трения ЯКЭУ

№	Наименование узла изделия	Сопрягаемые детали, материал		Допустимый коэффициент трения	Допустимый износ, мкм	Принятые решения по обеспечению работоспособности		
		Деталь 1	Деталь 2			Шероховатость поверхности, твердость		Смазочный материал
						Деталь 1	Деталь 2	
1	Органы регулирования							
1.1	Опора поворотная подшипник качения Ø17×Ø35×8 мм	Дорожки качения сплав 308	Шар Ø5,16 мм сплав 308	≤0,002	30	√0,16 HRC <sub>3</sub> 64...72	0,16 HRC <sub>3</sub> 64...72	Без смазки
1.2	Стержневой узел трения	Направляющая ЭП-126	Упор ВЖЛ2	≤0,2	300	√0,025	√0,025	Направляющая – MoS <sub>2</sub> методом втирания; упор – MoS <sub>2</sub> – электроискровое легирование +ВАП-2
2	Распределительный механизм							
2.1	Зубчатое зацепление	Зубчатое колесо 20X18H8B2	Зубчатое колесо 20X18H8B2	≤0,1	-	√1,6 HV ≥ 400 азотирование	√1,6 HV ≥ 800 азотирование	Твердосмазочное покрытие ВНИИ НП-213 рабочих поверхностей деталей
2.2	Подшипник качения Ø20×Ø37×9 мм	Дорожки качения 95X18-Ш	Шар 95X18-Ш	<0,002	30	√0,16 HRC <sub>3</sub> 56...61	√0,16 HRC <sub>3</sub> 56...61	Без смазки
3	Карданное соединение	Сухарь кардана ХН35ВПО-ВД покрытие никель	Паз вала 13X11H23M P-Ш	≤ 0,2	30	Торцевая поверхность сухаря √0,8 HV ≥ 550, никелирование	Торцевые поверхности паза √1,6 HRC <sub>3</sub> 32...41	То же

Т а б л и ц а 28

## Условия и результаты испытаний поворотных опор органов регулирования ЯКЭУ

Параметры	Вид испытаний		
	Испытания тепловых макетов	Наземные натурные энергетические испытания	Космические натурные испытания энергетических установок
1 Объект испытаний Подшипник качения Ø17×Ø35×8 мм поворотных опор органов регулирования	Испытания в составе тепловых макетов энергоблока и изделия	Испытания в составе энергетического изделия на наземном стенде	Испытания в составе космических энергетических изделий
2 Условия испытаний: температура, °С среда давление среды, кПа радиация нагрузки характер движения, скорость назначенный ресурс	600 Аргон (50%) + гелий (50%) 196 Радиационные потоки отсутствуют Радиальная – 50 Н; Осевая – 60 Н Возвратно-вращательное на угол (0,3...0,8)°; 0,1°/с	600 Аргон (50%) + гелий (50%) 39...196 Нейтроны – $7,2 \cdot 10^{11}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $5,6 \cdot 10^{12}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с Радиальная – 50 Н; Осевая – 60 Н Возвратно-вращательное на угол (0,3...0,8)°; 0,1°/с 3000 ч, 36000 циклов срабатываний	600 Аргон (50%) + гелий (50%) 39...196 Нейтроны – $9,5 \cdot 10^{11}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $7,0 \cdot 10^{12}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с – Возвратно-вращательное на угол (0,3...0,8)°; 0,1°/с 3000 ч, 36000 циклов срабатываний
3 Результаты испытаний			
3.1 Отработанный ресурс	3000 ч, 7000 циклов срабатываний	7346 ч, 97000 циклов срабатываний	8232 ч, 50000 циклов срабатываний
3.2 Моменты сопротивления вращению	В пределах нормы	В пределах нормы	В пределах нормы
3.3 Износ и состояние поверхностей трения	Износ беговых дорожек и тел качения незначителен	Подшипники и изделие сохранили работоспособность	Подшипники и изделие сохранили работоспособность
3.4 Параметры питания приводов и скорости вращения	В пределах нормы	В пределах нормы	В пределах нормы
4 Заключение	Подшипники находятся в работоспособном состоянии	Подшипники и изделие пригодны к дальнейшей эксплуатации	

Т а б л и ц а 29

## Условия и результаты испытаний узлов трения стержневых органов регулирования ЯКЭУ

№	Параметры	Вид испытаний		
		Испытания тепловых макетов	Наземные натурные энергетические испытания	Космические натурные испытания энергетических установок
1	Объект испытаний Узлы трения стержневых органов регулирования	Испытания в составе теплового макета энергоблока	Испытания в составе энергетического изделия на наземном стенде	Испытания в составе энергетических изделий на космическом аппарате
2	Условия испытаний: температура, °С среда давление среды, кПа радиация  нагрузка, Н характер движения, скорость  цикличность включений  назначенный ресурс	580 Аргон 140  Радиационные потоки отсутствуют 10...50  Возвратно-поступательное скольжение на ±190 мм, скорость 0,3 мм/с 150 циклов за время испытаний	580 аргон 38...150 Нейтроны – $1,5 \cdot 10^{13}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $0,9 \cdot 10^{14}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с 10...50  Возвратно-поступательное скольжение на ±0,5 мм, скорость (0,04...0,30) мм/с 1 цикл/час. Один раз в 24 ч проверка хода на ±190 мм 2000 ч, 30000 срабатываний	580 аргон 38...150 Нейтроны – $1,2 \cdot 10^{11}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $0,8 \cdot 10^{12}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с 10  Возвратно-поступательное скольжение со скоростью (0,04...0,30) мм/с 30 включений/ч  2000 ч, 30000 срабатываний
3	Результаты испытаний			
31	Отработанный ресурс, час	1200 ч, 150 циклов перемещений на ±190 мм	4500 ч, 2000 циклов срабатывания на 0,5 мм и 90 циклов на ±190 мм	7609 ч, 66000 циклов срабатывания приводов
32	Усилие сопротивления движению	В пределах нормы	В пределах нормы	В пределах нормы
33	Износ и состояние поверхностей трения	Следы износа на поверхности направляющей	Пары трения и изделие сохранили работоспособность	Пары трения и изделие сохранили работоспособность
34	Параметры питания приводов	-	В пределах нормы	В пределах нормы
4	Заключение	Пары трения находятся в работоспособном состоянии	Пары трения и изделие пригодны к дальнейшей эксплуатации	

## Условия и результаты испытаний узлов трения распределительного механизма ЯКЭУ

№	Параметры	Вид испытаний		
		Испытания тепловых макетов	Наземные натурные энергетические испытания	Космические натурные испытания энергетических установок
1	Объект испытаний			
1.1	Распределительный механизм: – зубчатое зацепление; – подшипник $\varnothing 20 \times \varnothing 37 \times 9$ мм;	Испытания в составе теплового макета энергоблока	Испытания в составе энергетического изделия на наземном стенде	Испытания в составе энергетических изделий на космическом аппарате
1.2	Карданное соединение			
2	Условия испытаний: температура, °С среда давление среды, кПа радиация  характер движения, скорость назначенный ресурс	400, для кардана 400...600 50% аргон + 50% гелий 196 Радиационные потоки отсутствуют Возвратно-вращательное на угол 0,3...0,8°, скорость 0,1°/с	400, для кардана 400...600 50% аргон + 50% гелий 196 Нейтроны – $0,76 \cdot 10^{11}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $0,59 \cdot 10^{12}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с Возвратно-вращательное на угол 0,8°, скорость 0,1°/с 3000 ч, 36000 циклов срабатываний	400, для кардана 400...600 50% аргон + 50% гелий 39...196 Нейтроны – $0,76 \cdot 10^{11}$ Н/см <sup>2</sup> ·с; γ-кванты – $0,59 \cdot 10^{12}$ Мэв/см <sup>2</sup> ·с Возвратно-вращательное на угол 0,3...0,8°, скорость 0,1°/с 3000 ч, 36000 циклов срабатываний
3	Результаты испытаний			
3.1	Отработанный ресурс	3000 ч, 7000 циклов срабатываний	7346 ч, 97000 циклов срабатываний	8232 ч, 50000 циклов срабатываний
3.2	Моменты сопротивления вращению	В пределах нормы	В пределах нормы	В пределах нормы
3.3	Износ и состояние поверхностей трения	Износ незначительный, пары трения сохранили работоспособность	Пары трения и изделие сохранили работоспособность	Пары трения и изделие сохранили работоспособность
3.4	Параметры питания приводов и скорость вращения	Отклонения по скорости в пределах нормы	Параметры питания приводов и скорости вращения находились в пределах нормы	
4	Заключение	Пары трения находятся в работоспособном состоянии	Пары трения и изделие пригодны к дальнейшей эксплуатации	



## П Р И Л О Ж Е Н И Е

### Зарубежные аналоги некоторых материалов

№	Материал по российским стандартам	Прототипы по международным стандартам
1	38ХНВЮ	Type 4337H (0,4C-1Cr-2Ni-Mo-Fe - основа), AISI-SAE
2	58НХВКТБЮ	Type 8660H (0,6C-1Ni-1Cr-Mo), AISI-SAE
3	Сплавы 307,308	–
4	ХН78Т (ЭИ435)	Grade Inconel (78Ni-15Cr-7Fe), ASTM
5	ВЖЛ2 (14Cr-Si-5Mo-15W-2Ti-2Al-5Fe-Ni-основа)	Grade Thetaloy (50Ni-25Cr-12,5Co-7W-3Mo-2,5Mn), ASTM
6	2Х18Н8В2 (18Cr-8Ni-2,2W-Fe-основа)	Type 19-9DL (19Cr-9Ni-1,25Mo-1,25W), AISI, или 331S40 (NiCrW 14/14/21/4) BS970 Part 4:1970
7	ЭП126 (21Cr-28Ni-5W-3Vо-Fe- основа)	Grade D-979 (15Cr-45Ni-4W-4Mo-3Ti-1Al), ASTM
8	ХН35ВТЮ (15Cr-35Ni-3W-1,2Al-3Ti-Fe-основа)	Grade D-979 (15Cr-45Ni-4W-4Mo-3Ti-1Al), ASTM
9	13ХН2ВМФ (11Cr-1,7Ni-0,3V-1,8W-Fe-основа)	Greek Ascoloy (13Cr-2Ni-3W-Fe- основа), AISI, или Type 422 (12Cr-1Mo-1W-0,3V-Fe-основа), AISI

### *Библиографический список*

1. *Физика Луны и планет.* М.: Наука,1972.
2. *Современные представления о Луне.* М.: Наука, 1972.
3. *Мороз, В.И.* Физика планеты Марс. М.: Наука, 1978.
4. *Эксплуатационные условия функционирования и сопряжения научной аппаратуры с космическим аппаратом Марс-94.* М.: НИЦ им. Бабакина, 1989.
5. *Планетоходы.* 2-е изд. / Под ред. А.Л. Кемурджиана. М.: Машиностроение,1993.
6. *Трение и износ в вакууме / И.В. Крагельский [и др.].* М.: Машиностроение,1973.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение .....	3
1. ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ....	5
1.1. Этапы эксплуатации.....	5
1.1.1. Наземный этап .....	5
1.1.2. Космический этап.....	7
1.2. Влияние факторов космического пространства на материалы пар трения.....	9
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	13
2.1. Конструкционные материалы .....	13
2.2. Антифрикционные пластичные смазки.....	19
2.3. Антифрикционные покрытия.....	26
2.4. Самосмазывающиеся материалы .....	30
2.5. Поверхностно-активные вещества.....	36
2.6. Магнитопорошковые смазки.....	40
2.7. Материалы для ядерных космических энергоустановок .....	46
П р и л о ж е н и е. Зарубежные аналоги некоторых материалов .....	53
Библиографический список .....	53

*Маленков Михаил Иванович, Каратушин Станислав Иванович,  
Тарасов Вячеслав Михайлович*

### **Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов**

Редактор *Г.М. Звягина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Подписано в печать 08.08.2007. Формат бумаги 60x84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,15. Тираж 100 экз. Заказ № 133

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1

