

УДК 621.833; 669.056.9: 629.118.6

Е.И. МАРДОСЕВИЧ, канд. техн. наук; А.А. ГЛАЗУНОВА  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. МинскА.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск**ПАРЫ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ ПРИВодОВ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

*Рассмотрены пары трения качения экспериментальных образцов подвижных соединений программно-управляемых приводов техники, работающей в условиях разряженного пространства и вакуума, изготавливаемые из перспективных композиционных материалов на основе МДО-покрытий.*

**Ключевые слова:** плакирование, узлы трения, подшипники качения, МДО-покрытие, антифрикционный материал

**Введение.** При создании приводов аэрокосмической техники, работающих в условиях разряженного пространства и открытого космоса, к одному из наиболее ответственных узлов, оказывающих существенное влияние на работоспособность изделия в целом, можно отнести подвижные соединения.

Для обеспечения их работоспособности используются различные, в том числе композиционные, твердые смазочные материалы, которые могут испаряться в вакууме в дальнейшем, практически не оседая на исходную поверхность [1]. При этом стойкость к воздействию космического излучения таких материалов, как Cd, Zn, Mg, невелика, и более пригодны для длительного использования в космическом пространстве Al, Be, Cr, Mg, Si, Ti, Zn, а также отдельные полимерные композиты [2, 3]. Авторами [1] отмечено, что к одному из основных факторов, учитываемых при использовании тех или иных материалов, можно отнести вопросы теплопередачи от узла трения, а также «несвариваемость» поверхностей при повышении температуры и нагрузки в зоне контакта при возникновении граничного и сухого трения [4].

Для решения этих проблем предлагаются различные подходы [5], например, использование композиционных материалов [6], сочетающих механическую прочность металлической основы и антифрикционные свойства поверхности с возможностью обеспечения длительного и надежного функционирования в условиях вакуума до 10–13 мм рт. ст., радиации до 108 рад, сверхнизких (от 3 К) и высоких (до 973 К) температур. Эти материалы были использованы для «деталей зубчатых передач высокой точности, кулачков и других деталей сложной формы, подвергающихся механической обработке» [6], т. е. преимущественно в узлах трения скольжения. Механические и триботехнические свойства этих материалов приведены в таблице.

Приведенные в таблице коэффициенты трения достаточно высоки, что характерно для пар трения скольжения, работающих в вакууме. Поэтому в подвижных соединениях с высокими требованиями к плавности, ресурсу и энергоэффективности до настоящего времени, как правило, используются пары трения качения. Традиционно — это либо подшипники качения со стальными наружной и внутренней обоймами и шариками, либо гибридные шарикоподшипники с керамическими шариками или шариками из кубического нитрида бора. Могут применяться и полностью керамические шари-

коподшипники, которые все в большей мере используются в ответственных узлах различной техники [7–19].

Использование керамических шарикоподшипников существенно повышает стоимость изделия, однако это не является определяющим фактором при решении вопроса о целесообразности их использования, поскольку, как правило, применение таких подшипников способствует повышению ресурса работоспособности подвижного соединения. Кроме того, возможно избежать проблем схватывания контактирующих поверхностей и заклинивания подвижного соединения при его функционировании в разряженном пространстве и вакууме.

К более существенным факторам, ограничивающим в ряде случаев возможность применения керамических пар трения качения в рассматриваемых областях, можно отнести теплоизолирующие свойства используемых в этих парах прессованных элементов из порошковой керамики и необходимость учета различия в коэффициентах теплового линейного расширения материала. Особенно это важно при использовании корпусных деталей из алюминиевых сплавов для исключения «раскрытия» посадочных соединений, заклинивания и люфтов, ограничивающих возможности использования скоростных режимов функционирования.

К одному из перспективных путей решения проблемы создания эффективных антифрикционных покрытий можно отнести использование композитов на основе МДО-покрытий (оксидокерамики  $Al_2O_3$ ), сформированных непосредственно на корпусных деталях с последующим плакированием антифрикционным материалом, используемых в качестве дорожек качения.

**Таблица — Трибомеханические характеристики деталей трения из композиционных материалов [6]**

Характеристики	Значения
Предел прочности, МПа:	
- при растяжении	60–200
- при сжатии	400–860
- при срезе	70–210
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,4–8,6
Твердость, НВ 2,5/62,5/30	60–190
Коэффициент трения в вакууме	0,08–0,20
Интенсивность износа	$5,0 \cdot 10^{-8}$ – $2,0 \cdot 10^{-10}$

**Целью проведения НИР** являлась разработка методических подходов к созданию подвижных соединений программно-управляемых сверхлегких приводов аэрокосмической техники с узлами трения на основе подшипников качения без наружных и внутренних обойм с дорожками качения, сформированными на корпусе и наружной поверхности вала.

**Методический подход.** В качестве объекта исследований принята пара трения качения (в базовом исполнении — шарикоподшипник) двигателя-маховика системы активной ориентации нано- и пикоспутников.

Типовые конструкции двигателя-маховика системы активной ориентации космической техники показаны на рисунке 1 [7, 8].

К важнейшим, с позиций наиболее эффективного решения рассматриваемой задачи, особенностям конструкций, показанных на рисунке 1, можно отнести следующие: - для снижения условно «пассивной» массы (к условно «активной» массе отнесена масса маховика) конструктивные элементы двигателя-маховика выполнены тонкостенными, что необходимо учитывать при выборе технологической схемы и тепловых режимов формирования функциональных композиционных покрытий на дорожках качения;

- подшипники качения находятся внутри кожуха, что позволяет использовать смазочные материалы типа дисульфида молибдена, однако температурный диапазон функционирования этих смазок ограничен;

- в качестве материала основных компонентов двигателя-маховика используется сталь, что, с одной стороны, исключает проблему, обусловленную различием в коэффициентах теплового расширения компонентов привода из различных материалов, с другой стороны, приводит к увеличению массы объекта.

Как альтернативное конструктивное исполнение подшипникового узла, ориентированное на решение поставленной задачи, было принято техническое решение, показанное на рисунке 2.

К основным особенностям предлагаемого технического решения можно отнести следующее:

- МДО-покрытие сформировано непосредственно на основании и валу, изготовленных из алюминиевых сплавов, что позволяет при корректном подборе алюминиевого сплава, режимов и толщины покрытия решить проблему обеспечения высоких адгезионных свойств и, по меньшей мере, в 2–2,8 раза уменьшить их массу;

- МДО-покрытие, имеющее твердость 16 ГПа и более, при корректно подобранной толщине обеспечивает высокую прочность дорожек качения при их локализованном нагружении шариками;

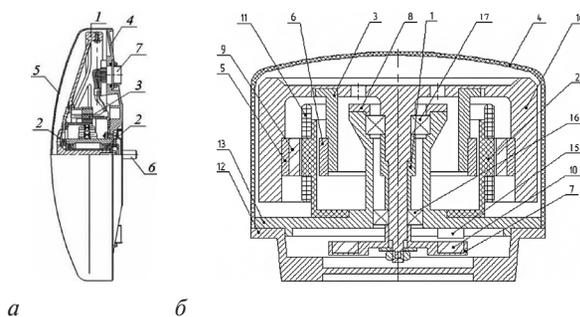
- состав МДО-покрытия ( $Al_2O_3$ ) исключает возникновение схватывания дорожек качения со стальными шариками;

- плакирование поверхности МДО-покрытия антифрикционным слоем толщиной 1–2 мкм, например, карбидом хрома [19], позволяет обеспечить КПД подшипникового узла не менее 98–99 % и, в ряде случаев, отказаться от использования смазки, расширив температурный диапазон функционирования от  $-150\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+180\text{ }^\circ\text{C}$ ;

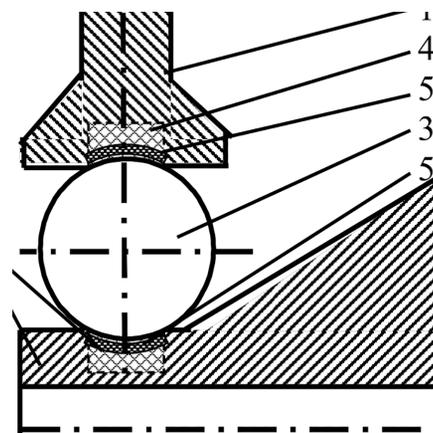
- возможность использования в двигателе-маховике системы активной ориентации нано- и пикоспутников шариков диаметром 0,635–1 мм при диаметре вала 4–5 мм позволяет практически исключить влияние различия в коэффициентах теплового линейного расширения поверхностей материала дорожек качения с МДО-покрытием и стальных шариков, сместив изменение геометрических размеров в область упругой деформации, и использовать скорости вращения до 40–50 тыс. об/мин, что позволяет без снижения инерционных моментов уменьшить габаритные размеры и массу двигателя-маховика;

- использование показанной на рисунке 2 схемы подшипникового узла позволяет существенно модернизировать конструктивную схему двигателя-маховика путем совмещения ряда функций элементов конструкции и, для отдельных исполнений, выполнить ее по существу безкорпусной или с полимерным кожухом и в совокупности уменьшить массу двигателя-маховика в 1,5–2 раза.

Процесс формирования МДО-покрытия анодно-катодной микродуговой обработкой в основном реализуется при температуре менее  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме того, это покрытие формируется на локализованном участке дорожки качения. В совокупности вероятность возникновения короблений практически исключается. Поэтому к основному требованию к технологии поверхностного плакирования МДО-покрытия антифрикционным материалом следует отнести тепловой режим ее реализации, не приводящий к возникновению короблений. Одним из перспективных вариантов реализации такой технологии может быть плакирование поверхности МДО-покрытия, например, пиролитическим осаждением карбида хрома из хроморганической жидкости типа «Бархос» с использованием лазерной технологии [18].



**Рисунок 1** — Примеры конструктивного исполнения двигателя-маховика системы активной ориентации космической техники (а [7]: 1 — маховик, 2 — шарикоподшипники, 3 — электродвигатель, 4 — основание, 5 — кожух; б [8]: 1 — ротор двигателя, 2 — статор двигателя, 3 — индуктор двигателя, 4 — кожух, 5 и 6 — кольца, 7 — кронштейн, 8 — шайба, 9 и 10 — магниты, 11 — обмотка, 12 и 13 — основание, 14 — маховик, 15 — датчики Холла, 16 и 17 — подшипники качения)



**Рисунок 2** — Условная схема подшипникового узла: 1, 2 — основание и вал из алюминиевого сплава; 3 — стальной шарик; 4 — МДО-покрытие; 5 — антифрикционное покрытие

Таким образом, в качестве базовой технологической схемы изготовления композиционных покрытий на дорожках качения, сформированных на выполненных из алюминиевых сплавов корпусе и наружной поверхности вала подвижного соединения, может быть принято:

- предварительное создание на поверхностях дорожек качения в качестве подложек МДО-покрытий, толщина которых, с одной стороны, обеспечивает достаточную при локализованном нагружении прочность, с другой стороны, исключает, с учетом термоциклирования, возможность отслаивания этого покрытия в результате воздействия остаточных напряжений на границу перехода материала основы в МДО-покрытие;
- механическая обработка поверхности МДО-покрытия, обеспечивающая соответствующие требованиям к дорожкам качения подшипников точностные характеристики;
- размерное формирование плакированием на поверхности МДО-покрытия антифрикционного слоя при режимах, исключающих изменение взаимного положения рабочих поверхностей (коробление) и необходимость дальнейшей (кроме суперфинишной) их механической обработки.

**Основные выводы и результаты.** Предложены методические подходы к созданию подвижных соединений программно-управляемых сверхлегких приводов аэрокосмической техники с узлами трения на основе подшипников качения без наружных и внутренних обойм с дорожками качения, сформированными на корпусе и наружной поверхности вала. При этом при изготовлении основных компонентов подвижного соединения из алюминиевых сплавов на созданных непосредственно на этих компонентах дорожках качения формируются МДО-покрытия с последующим (после механической обработки) их бездеформационным плакированием антифрикционным материалом.

Реализация этого подхода позволит уменьшить массу двигателя-маховика системы активной ориентации нано- и пикоспутников в 2–2,5 раза с сохранением минимизированных потерь в парах трения-качения в расширенном от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$  диапазоне режимов функционирования.

#### Список литературы

1. Инженерный справочник по космической технике / 2-е изд. доп. и перераб. — 1977. — 430 с.
2. Материалы полимерные для космической техники. Требования к испытаниям на стойкость к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения: ГОСТ 25645.338-96. — М.: Гостандарт, 1998. — 16 с.
3. Дергулян, Ф.П. Композиционный полимерный тонколистовой материал (КПТМ) для работы в трибосопряжениях при экстремальных условиях / Ф.П. Дергулян // Инженерный вестник Дона. — 2007. — № 2. — С. 4–14.
4. Воронков, Б.Д. Подшипники сухого трения / Б.Д. Воронков. — Л.: Машиностроение, 1979. — 224 с.
5. Космическая трибология: состояние и перспективы / Н.К. Мышкин [и др.] // Механика машин механизмов и материалов. — 2012. — № 3. — С. 126–130.
6. АО «Корпорация ВНИИЭМ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?Itemid=56&catid=41:2008-04-07-15-51-25&id=127:2008-05-24-20-59-09&option=com\\_content&view=article](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?Itemid=56&catid=41:2008-04-07-15-51-25&id=127:2008-05-24-20-59-09&option=com_content&view=article).
7. Бритова, Ю.А. Частотный анализ шарикоподшипниковой опоры исполнительного органа на базе управляемого двигателя-маховика, применяемого для управления ориентацией космического аппарата / Ю.А. Бритова / Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 3. — Режим доступа <http://cyberleninka.ru/article/n/chastotnyy-analiz-sharikopodshpnikovoy-opory-ispolnitelnogo-organa-na-baze-upravlyаемого-dvigatelya-mahovika-primenyaемого-dlya>.
8. Тараканец, Е.А. Электромеханический исполнительный орган для системы ориентации малого космического аппарата / Е.А. Тараканец, В.С. Дмитриев / Вестник науки Сибири. — 2014. — № 1. — С. 11–16.
9. Найдич, Ю.В. Конструкционный сверхтвердый материал на основе кубического нитрида бора в опорах и узлах сухого трения / Ю.В. Найдич, А.А. Адамовский / Доповіді Національної академії наук України. — 2012. — № 3 — С. 99–103.
10. Петров, Н.И. Пути повышения надежности и ресурса подшипниковых опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов / Н.И. Петров, Ю.Л. Лаврентьев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2015. — Т. 14, № 3, Ч. 1. — С. 228–236.
11. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты и испытания / Т.Д. Каримбаев [и др.] // Композиты и наноструктуры. — 2010. — № 2. — С. 12–27.
12. Доценко, В.Н. Вопросы исследования керамических и гибридных подшипников качения и их применение в авиационных двигателях / В.Н. Доценко, С.В. Никитин // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 8(55). — С. 138–144.
13. Загашвили, Ю.В. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами / Ю.В. Загашвили, В.И. Кулик, А.С. Орыщенко // Инновации. — 2007. — № 12(110). — С. 94–98.
14. Барманов, И.С. Исследование осевых динамических характеристик подшипника №126126с керамическими шариками / И.С. Барманов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2014. — № 2. — С. 194–195.
15. Оптимизация технологии термодиффузионной обработки керамических порошков для плазменного напыления внешних колец подшипников электроустановок / О.Г. Девойно [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2015. — № 1(51). — С. 48–55.
16. Исаева, Е.А. Создание компенсаторов термических напряжений для перспективного авиационного ГТД методами порошковой металлургии / Е.А. Исаева, С.А. Первоин, Д.А. Исаев // Известия МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 2, № 2(16). — С. 331–336.
17. Панов, А.Д. Трибологические особенности конструктивных керамических материалов в подшипниках скольжения / А.Д. Панов, И.М. Панова // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» — 2015. — Т. 7, № 1. — С.1–9. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/78TVN115>.
18. Сердобинцев, Ю.П. Обзор и анализ применения керамических материалов в различных отраслях промышленности / Ю.П. Сердобинцев, М.Ю. Харьков, Наззал Анан Се // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 1. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12085>.
19. Осаждение пленок и покрытий при разложении металлоорганических соединений / Б.Г. Грибов [и др.]. — М.: Наука, 1981. — 322 с.

Mardosevich H.I., Glazunova H.A., Kalinichenko A.S.

#### Rolling friction pairs of driving mechanisms of the space equipment

Rolling friction pairs of experimental models of the sliding joints of program-controlled driving mechanisms of the technique, operating in the conditions of the discharged space and a vacuum, made of perspective composite materials on the basis of MAO-coatings are considered.

Поступил в редакцию 10.10.2016.