



УДК 621.822.1: 621.793.74
ГРНТИ 55.03.33: 55.21.99

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И КОНСТРУКТОРСКИХ МОДИФИКАЦИЙ

Г.И. ТРИФОНОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Д.В. МИТРОФАНОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье предложена конструкторская модификация авиационных подшипников скольжения, которые используются в опорах газотурбинных двигателей, а также технология плазменного напыления для повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей подшипниковых узлов летательных аппаратов.

Ключевые слова: подшипник скольжения; газотурбинный двигатель; летательный аппарат; плазменное напыление; износ; порошковое покрытие; модификация.

IMPROVEMENT OF AVIATION BEARINGS BY USING THERMAL TREATMENT AND DESIGN MODIFICATIONS

G.I. TRIFONOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

D.V. MITROFANOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

In article proposed a design modification of aircraft bearing, which are used in the supports of gas turbine engines, as well as technology of plasma spraying to improve the operational properties of working surfaces of bearing assemblies aircraft.

Keywords: bearing, gas turbine engine, aircraft, plasma spraying, wear, powder coating, modification.

Введение.

На сегодняшний день одна из актуальных и главных конструкционных задач, стоящих перед авиастроением, является повышение эксплуатационных свойств узлов, которые подвергаются повышенному износу в ходе эксплуатации летательного аппарата (ЛА).

В частности, из уравнения существования летательного аппарата следует вывод о том, что для решения актуальных и производственных задач в части создания самолетов с высокими показателями эффективности требуются повышение удельной тяги двигателя и снижение удельного расхода топлива [1]:

$$m_0 = \frac{m_{\text{equipment}} + m_{\text{fuel}} + m_{\text{cargo}} + m_{\text{engines}}}{1 - (\xi_{\text{fuselage}} + \xi_{\text{wing}} + \xi_{\text{tail}} + \xi_{\text{cockpit}} + \xi_{\text{fuelsystem}} + \xi_{\text{chassis}} + \xi_{\text{equipment}})}$$



где m_0 – взлетная масса гипотетического ЛА; $\zeta_{fuselage}$ – масса фюзеляжа; ζ_{wing} – масса крыла и посадочного механизма; ζ_{tail} – масса хвостового оперения; $\zeta_{cockpit}$ – масса кабины экипажа; $\zeta_{fuelsistem}$ – масса топливной системы; $\zeta_{chassis}$ – масса шасси и посадочных устройств; $\zeta_{equipment}$ – масса авиационного радио- и другого оборудования; $m_{equpage}$ – масса экипажа; m_{fuel} – масса топлива; m_{cargo} – масса полезной нагрузки; $m_{engines}$ – масса силовой установки.

Это заставляет инженеров-конструкторов силовых установок предусматривать более высокие значения газодинамических параметров рабочего цикла двигателя, например, стремиться к уменьшению аэродинамического сопротивления элементов газозводушного тракта путем повышения рабочих частот вращения роторов.

При повышенных оборотах роторов резко увеличиваются нагрузки на все детали и узлы двигателя. Нагрузки носят переменный характер по величине, интенсивности и частоте воздействия приложенных сил. И, как следствие, подшипники опор роторов оказываются в очень сложных рабочих условиях, что значительно сокращает их ресурс [2].

Это заставляет разработчиков изыскивать новые варианты конструкции подшипниковых опор роторов для применения в перспективных двигателях. Из сложившейся ситуации можно выйти несколькими способами, к примеру, путем конструкторской модификации подшипников скольжения, а также повышением эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей подшипниковых узлов.

В статье предложена конструкторская модификация авиационных подшипников скольжения, которые используются в опорах газотурбинных двигателей (ГТД), а также газотермическая технология повышения свойств рабочих поверхностей подшипниковых узлов летательного аппарата.

Теоретическая часть и исследования.

Применение технологии плазменного напыления высокотвердых износостойких материалов на основе композитных порошковых материалов в авиационной отрасли, в частности подшипниковых узлов в опорах газотурбинных двигателей, обусловлено рядом уникальных физико-механических свойств, присущих плазменным покрытиям:

- 1) высокая твердость;
- 2) коррозионная стойкость;
- 3) теплостойкость;
- 4) температурная стабильность;
- 5) низкий коэффициент трения.

В таблице 1 приведены некоторые примеры использования плазменного покрытия в авиационной промышленности при упрочнении тяжелонагруженных и ответственных деталей.

Таблица 1 – Примеры использования и внедрения плазменных покрытий

Отрасль	Деталь	Материал покрытия
Ракетно-космическая техника	Детали двигателей, головки и сопла ракет, экраны, аппараты для космических исследований и т.д.	Вольфрам, оксид алюминия, оксид циркония, никелевые сплавы, композиционные материалы и т.д.
Авиационная промышленность	Тормозные колодки, лопатки турбин, обтекатели антенн, стойки шасси, камеры сгорания, приводы рулевых механизмов, подшипники скольжения и т.д.	Оксиды, карбиды, никелевые сплавы, истираемые покрытия и т.д.



Так, например, разработана технология нанесения бронзового, медного покрытия баббита для подшипников скольжения различных агрегатов (рисунок 1), позволяющая заменить изготовление подшипника целиком из бронзы [3]

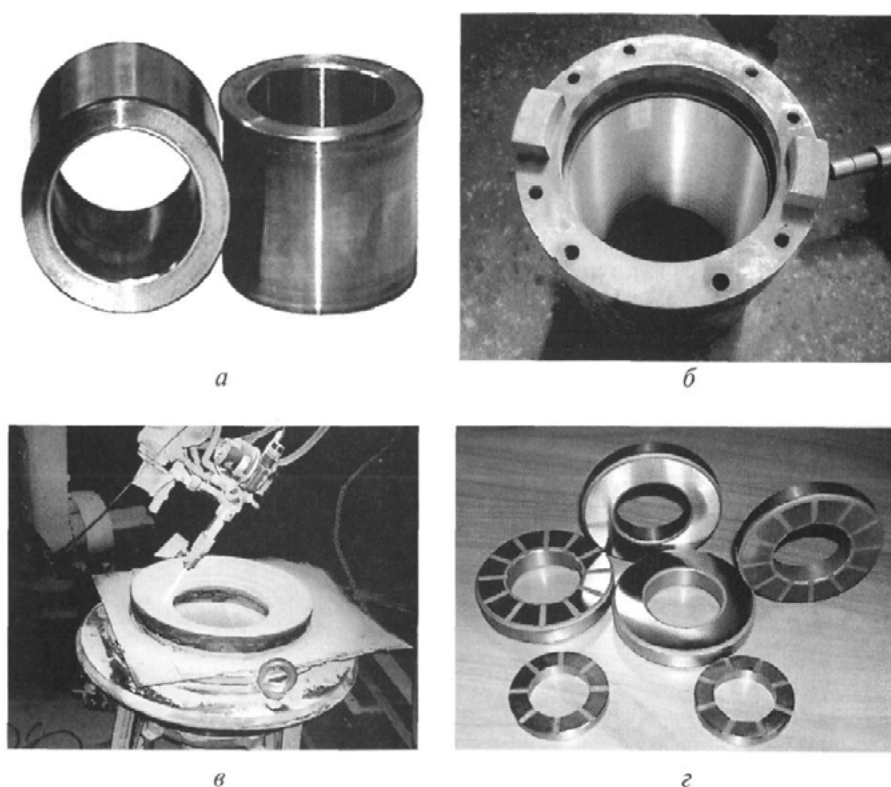


Рисунок 1 – Подшипники скольжения:
а – с напыленной бронзой; б – медью; в – процесс нанесения баббита;
г – упорный подшипник с износостойким покрытием

Экспериментируя с составом компонентов и свойствами изготавливаемых порошковых материалов для напыления, можно добиться получения не только работоспособных в условиях ГТД подшипников скольжения, но и получить лучшие рабочие характеристики по сравнению с аналогичными характеристиками металлических и гибридных подшипников качения [2]:

- расширенный рабочий температурный диапазон (ограничивается характеристиками смазывающих материалов);
- высокую виброустойчивость;
- химическую стойкость к различным агрессивным средам;
- бесшумность в работе;
- сохранение работоспособности при работе с недостаточным количеством смазки или с полным ее отсутствием;
- постепенное развитие отказа подшипника, что позволяет легко его диагностировать на начальных стадиях развития.

При анализе трущихся сочленений подшипниковых узлов в опорах газотурбинных двигателей было установлено, что подшипники скольжения имеют на рабочих поверхностях многочисленные риски и царапины, возникшие в результате попадания в зазоры абразивных частиц. Многочисленные царапины имелись и на стальных цапфах, сопрягаемых с подшипниками.



Результаты исследований и их обсуждение.

Подшипники, подвергаемые нанесению плазменных покрытий, предварительно проходили электрохимическое обезжиривание в специальном растворе. Плотность тока 2-6 А/дм². Экспериментальные исследования проводились на комплексе для плазменного напыления покрытия ТСЗП-МФ-Р-1000.

Основные режимы плазменного напыления были выбраны следующие [4]:

1. напряжение на дуге 30 ÷ 35 В;
2. сила тока 280 ÷ 350 А;
3. расход плазмообразующего газа аргона 20 ÷ 25 л/мин;
4. расход транспортирующего газа азота 2 ÷ 4 л/мин;
5. расстояние от сопла до напыляемой поверхности 50 ÷ 100 мм;
6. частота вращения детали 40 ÷ 60 об/мин;

Результаты исследований показали, что наибольшую стойкость к износу имеет покрытие на основе порошковой смеси ПГ-СР4, с добавлением 15-18 % карбида титана.

В таблице 2 представлена средняя микротвердость покрытий по измерению твердостей основных фаз.

Таблица 2 – Средняя микротвердость покрытий

№ п/п	Материал покрытия	Средняя микротвердость Покрытия, МПа
1	ПГ-СР3	3450
2	ПГ-СР4	3500
3	ПГ-СР4 + TiC	3650

Измерение пористости напыленных покрытий, которые выполнялись по общепринятой методике гидростатическим взвешиванием (ГОСТ 18893-73), показало снижение с 9-12% при традиционном напылении до 4,3-6,2% при плазменном напылении с добавлением доли карбида титана.

Испытания прочности сцепления покрытия с основой проводили на испытательной машине РМ50 по штифтовому методу.

Стойкость покрытий к износу оценивали по показателю относительной износостойкости, который определяли путем определения интенсивностей изнашивания (рисунок 2), а также по оценке коэффициента трения, который определялся с помощью установки по определению коэффициента трения и удельного давления у детали, которая описывалась авторами в работе [5].

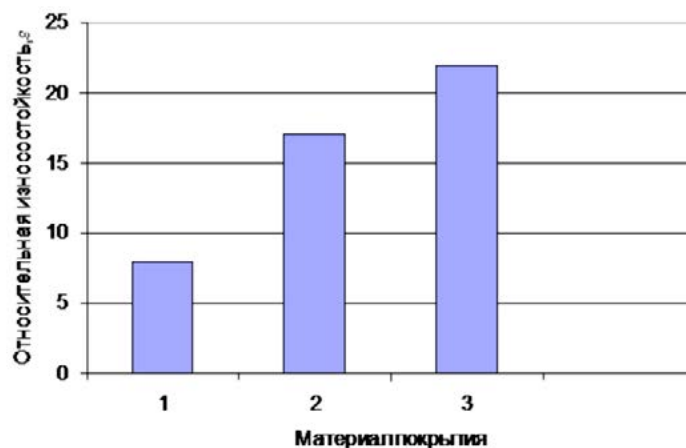


Рисунок 2 – Относительная износостойкость покрытия при плазменном напылении
1 – ПГ-СР3; 2 – ПГ-СР4; 3 – ПГ-СР4+TiC



В результате плазменного напыления и последующего оплавления компоненты в материале смешиваются и образуют покрытие композиционного типа, которое обладает повышенной износостойкостью, плотностью, прочностью сцепления, имеет высокую твердость и сопротивление ударам.

Однако процесс плазменного напыления не исключает деформации деталей, вызванной тепловым воздействием плазменной струи.

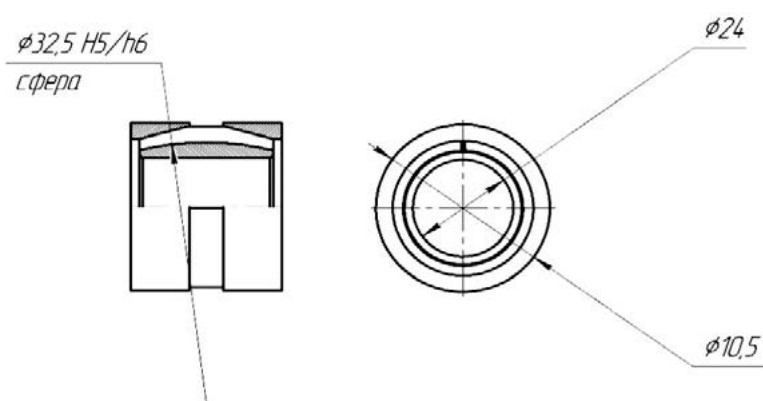
Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных [3-5] по снижению теплового воздействия плазменной струи на деталь показал перспективность методов:

применение аргоновой плазмы, имеющей быстрый спад температуры вдоль потока;

изменение дистанции напыления.

Сопоставление длины азотосодержащей плазменной струи и дистанции напыления позволило установить оптимальную дистанцию напыления – 100 мм.

Помимо технологических улучшений рабочих поверхностей подшипников скольжения в опорах газотурбинных двигателей, была разработана конструкционная модификация внутреннего кольца подшипника (рисунок 3).



*Подшипник скольжения сферический
принцип сборки: изготавливается сферическое кольцо
и ответная разрезная часть,
процесс сборки предусматривает запрессовку.*

Рисунок 3 – Модифицированный подшипник скольжения

Подшипник работает как обычный подшипник скольжения, за исключением того, что поверхностью трения выступает не цилиндрическая поверхность, а сферическая, что позволяет:

- увеличить площадь удельного давления;
- снизить зазоры;
- возможность самоустанавливаться;
- одновременное восприятие осевой и радиальной нагрузок.

Принцип сборки описанного подшипника: внутреннее кольцо с наружной сферой напрессовывается на вал, после чего напрессовывается разрезная обойма с внутренней сферой, затем вал с подшипником монтируется в корпус.

Результат достигнут тем, что вращение происходит по сферической поверхности и подшипник выступает в роли аналогов сферических подшипников качения. В сравнении с аналогами, конструкция более надежна и позволяет изготавливать валы для подшипников качения и скольжения. Возможность регулировки зазора между парой трения позволяет повысить ресурс.



Выводы.

Технология плазменного напыления порошкового материала ПГ-СР4 с добавлением карбида титана, интегрированная на контактные поверхности подшипника скольжения, позволяет повысить эффективность работы рассмотренного оборудования на 5-7%, а его ресурс на 16-18 %.

Разработанная новая конструкторская модификация авиационных подшипников скольжения существенно отличается от её аналогов возможностью регулировки зазора между парой трения, восприятием одновременно радиальных и осевых нагрузок, увеличенной площадью удельного давления и т.д.

Все приведенные улучшения и модификация позволяют повысить ресурс подшипниковых узлов в опорах газотурбинных двигателей, что в значительной степени сокращает затраты в авиационной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейнин В.М. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов [Текст] / В.М. Шейнин, В.И. Козловский // Весовой расчет самолета и весовое планирование Т.1, М.: «Машиностроение», 1977, 344 с.
2. Зубко А.И. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения [Электронный ресурс] / А.И. Зубко, С.Н. Донцов // Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск №74, С. 1 – 30, URL: <http://mai.ru/science/trudy> (дата обращения 07.10.2017).
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления // Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомполитов». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. – 360 с.
4. Жачкин С.Ю. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин [Текст] / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Журнал «Наука в Центральной России Science in the central Russia» ФГБНУ ВНИИТИН. №4 (28), 2017 г.- С.131-136.
5. Трифонов Г.И. Определение физико-механических свойств деталей летательных аппаратов в авиационной промышленности после комбинированной плазменной обработки [Электронный ресурс] / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, С.В. Лазарев // Воздушно-космические силы. Теория и практика. Выпуск №2, 2017, С. 18-25.

REFERENCES

1. Sheinin V.M. Weight design and efficiency of passenger aircraft [Text] / V.M. Sheinin, V.I. Kozlovsky // The weight calculation of the aircraft weight and planning T.1, M.: «Engineering», 1977, 344 p.
2. Zubko A.I. The study of the conditions of health and diagnostic development for the new generation ceramic bearings [Electronic resource] / A.I. Zubko, S.N. Dontsov // Electronic journal «Writings MAI», Release №74, P. 1 – 30, URL: <http://mai.ru/science/trudy> (date of access 07.10.2017).
3. Puzryakov A. F. Theoretical bases of technology of plasma spraying // Studies. Grant at the rate "Technology of Designs from Metalcomposites". 2nd prod., reslave. and additional – M.: MSTU publishing house of N. Je. Bauman, 2008. – 360 pages.
4. Zhachkin S. Yu. The use of plasma deposition process to improve the operational reliability of farm machinery [Text] / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, G.I. Trifonov // Journal «Science in the central Russia» Release №4 (28), 2017. – P.131-136.



5. Trifonov G.I Determination of physico-mechanical properties of parts of the aviation industry after combined plasma treatment [Electronic resource] / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, S.V. Lazarev // Air and Space forces. Theory and practice. Release №2, 2017, P. 18-25.

© Трифонов Г.И., Митрофанов Д.В., 2017

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Митрофанов Дмитрий Викторович, научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru