

Научная статья

УДК 621.822.1

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177617>

ОБЛИК ПЕРСПЕКТИВНОГО СЕГМЕНТНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ВЫСОКООБОРОТНЫХ РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Виктор Валентинович Кулалаев¹, Мария Викторовна Зюлькова², Павел Александрович Свдин³✉

^{1, 2, 3} ОКБ им. А. Люльки,

Москва, Россия

¹ kulalayev.viktor@gmail.com

² marri@nxt.ru

³ svodin.pavel@gmail.com ✉

Аннотация. Рассмотрены основные типы существующих подшипников скольжения, проведена их классификация. Описаны возможные методы повышения эффективности эксплуатации подшипников скольжения. На основании проведенной классификации предложен возможный облик и описан принцип работы перспективного сегментного подшипника скольжения, вкладыши которого изготовлены из керамического материала и обладают пористой структурой. Сформулированы дальнейшие задачи по исследованию предложенной конструкции.

Ключевые слова: подшипники опор роторов ГТД, гибридный подшипник скольжения, повышение эффективности подшипника скольжения, подшипник скольжения из керамического материала, принципиальная схема гибридного подшипника скольжения

Для цитирования: Кулалаев В.В., Зюлькова М.В., Свдин П.А. Облик перспективного сегментного подшипника скольжения из керамического материала с пористой структурой для высокооборотных роторов газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 159–166. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177617>

Original article

LAYOUT OF THE PROSPECTIVE SEGMENTAL PLAIN BEARING MADE FROM CERAMIC MATERIAL OF POROUS STRUCTURE FOR HIGH-SPEED GAS TURBINE ENGINE ROTORS

Viktor V. KulalaeV¹, Mariya V. ZyuV'kova², Pavel A. Svodin³✉

^{1, 2, 3} Lyulka Desing Bureau,

Moscow, Russia

¹ kulalayev.viktor@gmail.com

² marri@nxt.ru

³ svodin.pavel@gmail.com ✉

Abstract

The main issue of promising aircraft designing is the issue of improving its performance characteristics, which, in turn, requires aircraft engine designing engineers to ensure higher values of power plant cycle thermo-gas-dynamic parameters. This becomes possible due to application of front-end technologies of material science, a more advanced level of compressor blades and turbines profiling, as well as operating rotational speeds increasing of the

power plants rotors. Operating rotational speeds values increasing of the power plant shaft leads to the operational conditions complication, increase in temperature and power loads on the subassemblies and AGTD elements, in this respect new design and technological solutions when product designing are required.

Particularly, on achieving higher rotor speeds, serious loading increase on the engine rotor system and its elements, especially on bearing supports, which turn out to be in more complex operating conditions, which leads to severe life cycle reduction and failure inception [1]. Both cognizance and experience in the fields of materials science and technology of structural materials production, stored as of today, allow application of various state-of-the-art materials with enhanced strength characteristics, such as composite ceramic materials (CCM), in the AGTE units designs. Gradual implementation of these materials in stressed subassemblies of engines [2-5], such as combustion chambers and blade machines due to the enhanced (compared to the alternative materials) values of strength parameters, i.e. heat resistance, heat stability, hardness and melting temperature.

As of today, leading-in-industry foreign countries are already conducting research on the subject of plain bearings for low-speed rotors from porous ceramic material. Both experimental and theoretical experience described in [6-16] proved the advantage of porous ceramics application as a structural material for plain bearings.

Besides, one of the tasks while sliding bearing designing for a prospective gas turbine engine consists in the bearing optimal design scheme selecting. Presently, the main choice for actual power plants is bearings with rolling bodies, i.e. ball or roller ones. This category of bearings is convenient in operation due to their easy mounting, lack of need for a large amount of lubricant and relatively low cost. However, at high speeds of rotation of the rotor, these bearings lose their efficiency due to their service life reduction under these conditions. Besides, they produce a high noise level and wield increased values of rotating resistance. A promising option hereupon is considering the possibility of employing plain bearing in the rotor system design of a promising aircraft power plant, which main advantage is the possibility of operation at high shaft speeds.

The article presents a classification of existing schemes and types of plain bearings, on which basis the appearance of a promising plain bearing with segmented inserts from porous ceramic material for AGTD rotors supporting high operating speeds is formulated, and adduces certain suggestions for efficiency improving of its operation.

Keywords: support bearings of GTE rotors, hybrid plain bearing, plain bearing efficiency improving, plain bearing from ceramic material, hybrid plain bearing schematic diagram

For citation: Kulalaev V.V., Zyu'lkova M.V., Svodin P.A. Layout of the Prospective Segmental Plain Bearing Made from Ceramic Material of Porous Structure for High-Speed Gas Turbine Engine Rotors. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 159–166. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177617>

Введение

Сегодня основу боевой и пассажирской авиации составляют газотурбинные двигатели, повышение эффективности которых в основном зависит от научного прогресса в области материаловедения. В связи с этим дальнейшее развитие двигателестроения может потребовать пересмотра традиционных схем силовых установок. Например, ведутся исследования в области разработки и применения гибридных силовых установок [16, 17], в области использования передовых технологий, перспективных материалов в производстве основных узлов двигателя.

Теплонапряженные узлы авиационного ГТД пребывают в сложных рабочих условиях, характеризующихся высокими температурными нагрузками под действием радиальных и осевых сил. Обоснованным решением существующих проблем является использование перспективных материалов, таких как композитные керамические материалы и различные покрытия, в конструкции теплонапряженных узлов [2–5]. К данным узлам относятся камеры сгорания, лопатки и рабочие колеса тур-

бин, а также подшипники опор роторной системы двигателя.

Необходимо отметить, что с повышением частот вращения роторов, необходимых для достижения более высоких параметров эффективности цикла, усиливаются тепловые и температурные нагрузки на опорные подшипники скольжения, а это прямым образом влияет на их эксплуатационные характеристики. Исследуя вопросы повышения долговечности и надежности эксплуатации подшипников, современные ученые и инженеры разрабатывают мероприятия по уменьшению сил сопротивления [18], методы диагностики подшипников [21], изучают проблемы моделирования процессов деформации [19, 20].

Одной из задач, решаемых в «ОКБ им. Ляульки», является разработка перспективного подшипника скольжения, работающего в условиях высоких частот вращения роторов, температурных и силовых нагрузок. В данной статье представлен возможный облик такого подшипника, основанный на представленной ниже классификации.

Классификация подшипников скольжения

Подшипники скольжения можно классифицировать по следующим параметрам [22]:

- по видам смазки;
- по конструктивному исполнению;
- по форме рабочей поверхности;
- по типу материала.

По видам смазки подшипники скольжения условно можно разделить на две большие группы:

1. Гидростатические (газостатические) подшипники скольжения – категория подшипников скольжения, конструкция которых обеспечивает жидкостный режим трения посредством подачи насосом смазочного масла под заданным давлением в зазор между поверхностями трения (между валом и внутренней поверхностью подшипника), в результате чего в масляном слое возникает повышенное давление, благодаря которому образуется необходимый зазор между поверхностями трения. По типу воспринимаемых нагрузок гидростатические подшипники можно разделить на упорные и радиальные. Существенными недостатками данного вида подшипников являются наличие сухого трения между поверхностями ротора и внутренней стенки подшипника при запуске и гравитационных нагрузках. Принципиальная схема гидростатического подшипника скольжения представлена на рис. 1.

2. Гидродинамические (газодинамические) подшипники скольжения – категория подшипников скольжения, в которых смазочное масло распределяется по объему зазора за счет вращения ротора с заданной частотой. В начальный момент времени вал лежит на поверхности внутренней стенки корпуса подшипника. С началом вращения вала под действием рабочей нагрузки центр вала переходит в эксцентрическое положение относительно центра подшипника, в результате чего с двух сторон в месте минимального удаления трущихся поверхностей образуются клиновидные зазоры. Вал в данном случае выступает в качестве нагнетающего насоса, который за счет вязкостных сил подает послойно смазочное масло в образовавшиеся зазоры таким образом, что в сформированном слое масла давление растет до значения, обеспечивающего

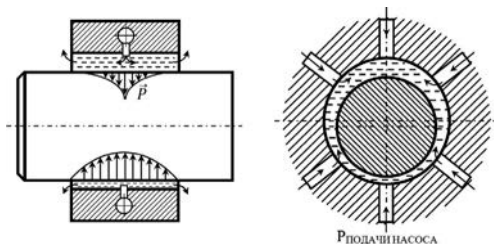


Рис. 1. Принципиальная схема гидростатического подшипника скольжения

полное «взвешивание» вала относительно статора, что означает достижение состояния оптимального равновесия конструкции и наличие режима жидкостного трения. Принципиальная схема гидродинамического подшипника представлена на рис. 2.

На рис. 2 обозначены: 1 – вал; 2 – подшипник; e – эксцентриситет; $O_{П}$ – центр подшипника; $O_{В}$ – центр вала; $W_{В}$ – скорость вращения вала; h – толщина смазочного слоя; Δ – оптимальный зазор между валом и подшипником; P – осевая нагрузка, действующая на конструкцию.

В таблице представлены основные преимущества и недостатки двух вышеописанных схем подшипников скольжения, анализ которых приводит к выводу о целесообразности рассмотрения комбинации двух предложенных конструкций, а именно гибридного подшипника скольжения смешанного типа. В предложенном варианте подшипника можно реализовать преимущества как гидростатической, так и гидродинамической схемы смазки подшипника, а следовательно, повысить его эффективность и эксплуатационный ресурс.

По конструктивному исполнению подшипники скольжения делятся на следующие типы:

- неразъемные и разъемные;
- самоустанавливающиеся;
- самосмазывающиеся;
- с нерегулируемым или регулируемым зазором;
- сегментные.

Неразъемные нерегулируемые подшипники скольжения состоят из корпуса, закрепленного штифтом в определенном месте, и вкладыша, изготовленного из материала с антифрикционным покрытием, чаще всего из баббита или бронзы, но также, в зависимости от условий эксплуатации,

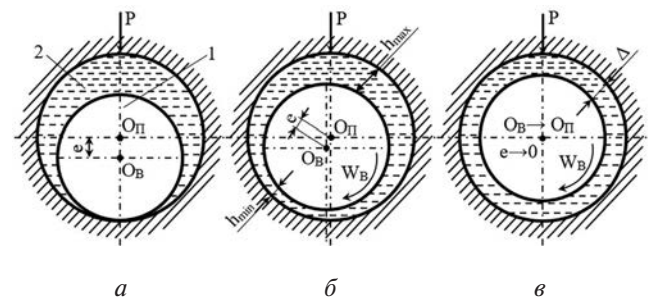


Рис. 2. Принципиальная схема гидродинамического подшипника скольжения:

- a – при неподвижном вале в начальный момент работы ($W_{В} = 0$);
- b – при гидродинамическом смазывании вращающегося вала в момент его подъема ($W_{В} > 0$);
- v – при «взвешивании» вала относительно подшипника ($W_{В} \rightarrow \infty$) (оптимальный режим эксплуатации – жидкостное трение [23])

Сравнительный анализ двух схем подшипников скольжения

Гидростатическая схема смазки		Гидродинамическая схема смазки	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Минимальный износ	Необходимость дополнительных агрегатов: насоса и устройства для подачи масла	Высокий эксплуатационный ресурс	Возможность эксплуатации только при высоких частотах вращения
Меньшая чувствительность к дефектам вала	Необходим дополнительный отбор мощности от ротора на обеспечение работы насоса	Низкий уровень шума и вибраций	
Невосприимчивость к изменениям нагрузок и скоростей	Высокий расход масла и низкие рабочие частоты вращения	Возможность демпфирования ударных нагрузок	Чувствительность к изменению температурного режима
		Автономность	

возможно использование стали, специального пластика, металлокерамики и т. д. Смазка подается через масляные канавки, откуда поступает в зазор подшипника, препятствуя контакту поверхностей трения.

Неразъемные регулируемые подшипники скольжения предоставляют возможность перемещения втулки посредством гаек, установленных по наружной резьбе подшипника, или же за счет сжатия втулки в прорези, что позволяет регулировать зазор между подшипником и втулкой.

Разъемные подшипники скольжения состоят из соединенных между собой болтами корпуса и крышки с установленными в них вкладышами, в одном из которых присутствует канавка и отверстие для подачи смазки. Толщиной прокладки, установленной между корпусом и крышкой, можно регулировать зазор.

Самоустанавливающиеся подшипники скольжения бывают двух типов: цельные и сегментные. Первый тип подшипников за счет сферической формы поверхности втулки и отверстия в корпусе подшипника препятствует перекоосу осей опоры и вала. Вкладыш сегментного самоустанавливающегося подшипника скольжения состоит из минимум трех сегментов, которые могут свободно перемещаться в радиальном и осевом направлениях, что позволяет уменьшить вибрационные нагрузки на конструкцию.

Самосмазывающиеся подшипники скольжения – это группа подшипников, не нуждающихся в смазывании на протяжении всего процесса эксплуатации, поскольку сама поверхность подшипника обладает хорошими трибологическими свойствами. Подшипники данного типа изготавливаются из материалов с малыми коэффициентами трения (трибополимеры), а также с использованием специальных порошковых напылений (графит) и применяются в конструкциях низкооборотных роторов.

По форме рабочей поверхности подшипники и цапфы бывают плоскими, коническими и цилиндрическими. Для увеличения подъемной силы клина возможно использование специальных вкладышей с развитой площадью поверхности на цапфе либо в конструкции самого подшипника скольжения, так как чем больше площадь контакта с масляным клином, тем выше подъемная сила.

Классифицируя подшипники скольжения по типу материала, из которого они изготовлены, необходимо отметить, что основными требованиями являются малый коэффициент трения, высокие показатели износоустойчивости, прирабатываемости, смачиваемости маслом и хорошая теплопроводность для эффективного отвода тепла из зоны трения.

Вкладыши подшипников скольжения изготавливают из металла, металлокерамики, а также из неметаллических материалов. Металлические вкладыши отличаются высокой прочностью и хорошим уровнем коэффициента теплопроводности, вследствие чего они получили наибольшее распространение. Данный тип вкладышей изготавливают из бронзы, алюминиевых сплавов и чугунов. Широко распространены баббитовые сплавы – сплавы на основе олова и свинца (а также сурьмы и т. д.), обладающие отличными антифрикционными свойствами. Известно, что баббиты обладают невысоким значением твердости [24], благодаря чему меньше изнашивается вал, их часто используют в качестве заливки для вкладышей подшипников скольжения при тяжелых и средних режимах работы (компрессоров и др.). При умеренных режимах работы часто используют подшипники с чугунными вкладышами [22].

В настоящее время широкое распространение получают пористые и непористые металлокерамические сплавы, полученные методами порошковой металлургии [18]. В авиационных, автомобильных и дизельных двигателях используют трехслойные

(триметаллические) вкладыши в конструкции подшипников, изготовленных путем спекания стальной ленты совместно со смесью порошков из 60% меди и 40% никеля с последующей пропиткой баббитом. В качестве материалов подшипников, работающих в тяжелых условиях, часто применяют металлокерамические сплавы на основе карбидов вольфрама, которые отличаются высокой износостойкостью. Методы порошковой металлургии позволяют также получать антифрикционные сплавы с пористой структурой, поры которых заполняют специальной минеральной смазкой, выступающей из пор по мере повышения трения и температуры и, как следствие, снижающей износ поверхностей контакта [18]. По мере понижения и стабилизации гидродинамического и теплового режимов в зоне контакта, смазка уходит обратно в поры подшипника. В качестве материалов для данного типа подшипников могут использоваться железные порошки и порошки цветных металлов, а также их смесь с графитовой добавкой, которая улучшает скольжение трущихся поверхностей, препятствуя заеданиям, зачастую возникающим в пористых железных подшипниках [18].

По результатам анализа теоретических данных, описанных в данном разделе, была получена классификация подшипников скольжения (рис. 3). Как видно из представленной схемы, возможным вариантом облика перспективного подшипника скольжения высокооборотного ротора является сегментный подшипник скольжения смешанного типа

(включающий в себя гидростатический и гидродинамический принципы смазки) с использованием вкладыша из пористого материала в конструкции, а также с развитием площади поверхности контакта.

Принципиальная схема и принцип работы перспективного сегментного подшипника скольжения смешанного типа с пористой структурой вкладыша

На рис. 4 представлена схема перспективного керамического подшипника скольжения смешанного типа.

В начальный момент времени смазочное масло из масляного коллектора 3 под избыточным давлением $p_{изб}$, обеспечиваемым насосом, подается в масляный зазор 7 через каналы 4 внутри сегментов 5 таким образом, что в точке минимального удаления поверхностей трения h_{min} давление масла на вал максимально, а в точке с максимальным зазором h_{max} — минимально. При данном условии обеспечивается движение вала из области повышенного давления в область с пониженным давлением, а следовательно, и его гидростатическое «всплытие», при котором значение эксцентриситета стремится к заданному значению, не равному нулю, а также обеспечивается необходимый для режима жидкостного трения минимальный зазор по всей поверхности контакта. По достижении режима жидкостного трения насос отключается, а вал начинает производить забор смазочного масла гидродинамическим способом.

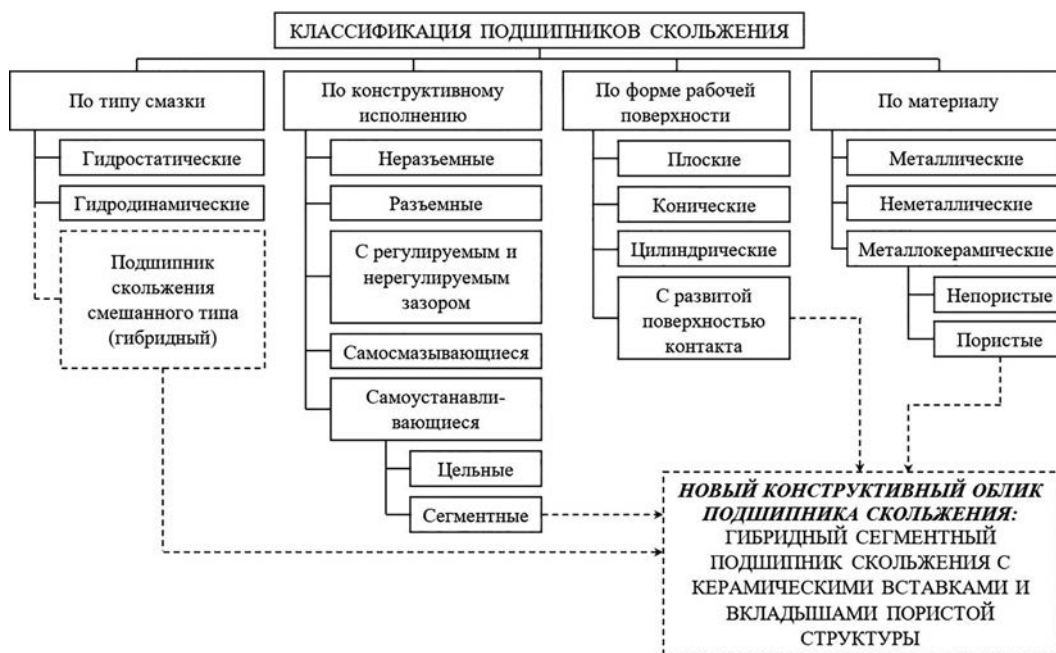


Рис. 3. Классификация подшипников скольжения

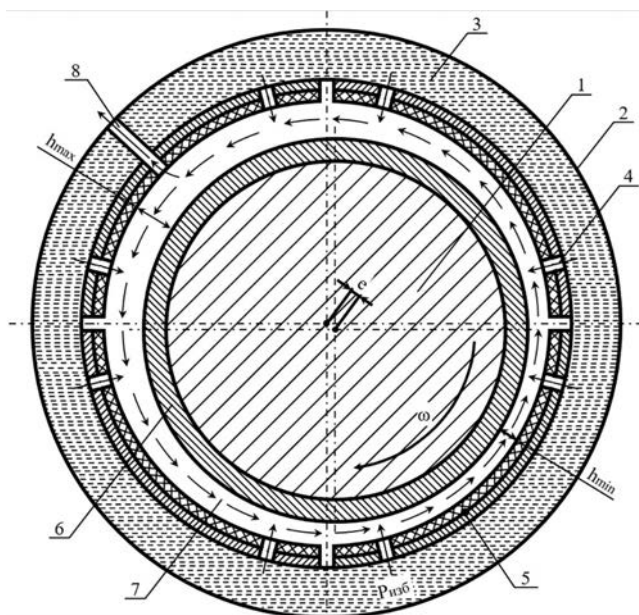


Рис. 4. Схема перспективного подшипника скольжения: 1 – вал; 2 – корпус подшипника; 3 – масляный коллектор; 4 – каналы подачи смазочного масла во вкладышах; 5 – пористые керамические вкладыши, установленные на подложке из металла (4 сегмента); 6 – вставка с развитием поверхности контакта вала и смазочного масла; 7 – масляный зазор; 8 – канал отвода смазочного масла; e – эксцентриситет между центрами вала и подшипника; h_{\min} (h_{\max}) – минимальный (максимальный) зазор; $p_{\text{изг}}$ – избыточное давление подачи масла; ω – угловая частота вращения вала

Стоит отметить, что металлокерамическая вставка 6, установленная на поверхности вала, может быть спрофилирована таким образом, что площадь поверхности контакта масла и вала увеличивается, тем самым обеспечивая повышенную подъемную силу масляного клина. Кроме того, возможно использование пористой структуры для усиления вышеописанного эффекта.

Использование пористой керамики в конструкции вкладышей сегментов 5 обеспечивает равномерное распределение масла по зазору, снижая его расход, а также повышает эффективность отвода тепла из зоны трения.

Выводы

По результатам проведенного теоретического исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. В настоящее время использование подшипников скольжения ограничено частотой вращения ротора.

2. Использование комбинированной схемы смазки в конструкции подшипника скольжения может улучшить его экономические и эксплуатационные характеристики.

3. Керамические композиционные материалы начинают широко применяться в качестве конструкционных материалов для напряженных узлов двигателя. Использование данной группы материалов в конструкции сегментных вкладышей подшипников скольжения и вала объясняется их повышенными антифрикционными свойствами, теплопроводностью, жаростойкостью и жаропрочностью, а также твердостью и пониженным коэффициентом трения.

4. Благодаря использованию пористой структуры керамических вкладышей и вставок можно значительно сократить расход смазочного масла, а также дополнительно охладить его, что положительно скажется на тепловом состоянии конструкции и будет способствовать эффективной эксплуатации подшипника скольжения при высоких значениях частоты вращения роторов.

5. В статье предложен возможный облик и описан принцип работы перспективного варианта гибридного подшипника скольжения с вкладышами и вставками из пористого керамического материала.

6. В рамках дальнейшей проработки данной темы необходимы гидравлический и тепловой расчеты, а также решение ряда локальных конструктивных задач (использование замков на стыках керамических вкладышей, гидравлический и тепловой расчет масла во вкладыше различной степени пористости, формирование развитой площади контакта на вставке вала, определение режима течения в масляном зазоре).

Список источников

1. Звонарев С.Л., Зубко А.И. О возможных причинах отказов подшипников качения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3-3(34). С. 16–22.
2. Бычков Н.Г., Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е. Оценка оптимальной толщины теплозащитных покрытий столбчатой структуры на рабочих лопатках турбин с учетом действия центробежных нагрузок // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26030>
3. Ширманов В.М., Богданов В.И., Щёголева Е.К. Опыт создания камеры сгорания из углеродно-керамических материалов для ГТД и перспективы её использования в ГПВРД // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. 2013. № 3(26). С. 76–79.
4. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Современные тенденции развития керамических материалов для теплозащитных

- покрытий и способов их нанесения на лопатки ГТД // Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД: Сборник докладов Научно-технической конференции (28 сентября 2016; Москва). М.: ВИАМ НИЦ “Курчатовский институт”, 2016. С. 15.
5. Wang L., Wood R., Powrie G. et al. Performance evaluation of hybrid (ceramic on steel) bearings with advanced aircraft engine oils for lubrication // ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air (14–17 June 2004; Vienna, Austria). Vol. 2, pp. 117–126. DOI: 10.1115/GT2004-53418
 6. Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2010. Vol. 224. No. 1, pp. 81–89. DOI: 10.1243/13506501JET570
 7. Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. № 3(87). С. 24–26.
 8. Зубко А.И., Донцов С.Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49296>
 9. Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Пути повышения надежности и ресурса подшипниковых опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3-1. С. 228–237. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-228-237
 10. Zaretsky E.V., Chiu Y.P., Tallian T.E. Ceramic bearings for use in gas turbine engines // American Society of Mechanical Engineers. 1989. Vol. 11, pp. 237–253. DOI: 10.1007/BF02834841
 11. Храмин Р.В., Кикоть Н.В., Лебедев М.В., Буров М.Н. Метод расчета тепловыделения гибридных подшипников с консистентной смазкой // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98896>
 12. Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л., Исследования гибридных (с керамическими шариками) и стальных подшипников качения при моделировании различных условий их эксплуатации в опоре высокооборотного ротора малоразмерного газотурбинного двигателя // Прочность и надежность газотурбинных двигателей: Сборник научных трудов ЦИАМ им. П.И. Баранова. М.: Изд-во ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 260–266.
 13. Zhao X.Z., Liu J.J., Zhu B.L. et al. Friction and wear of Si3N4 ceramic/stainless steel sliding contacts in dry and lubricated conditions // Journal of Materials Engineering and Performance. 1997. Vol. 6(2), pp. 203–208. DOI: 10.1007/s11665-997-0015-2
 14. Kato K. Tribology of ceramics // Wear. 1990. Vol. 136. No. 1, pp. 117–133. Kato, K. (1990). Tribology of ceramics. Wear, 136(1), 117–133. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90075-1
 15. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. – С. 270–349.
 16. Сычёв А.В., Балясный К.В., Борисов Д.А. Гибридная силовая установка с использованием электрического двигателя и двигателя внутреннего сгорания с общим приводом на воздушный винт // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 172–185. DOI: 10.34759/vst-2022-4-172-185
 17. Бондаренко Д.А., Равикович Ю.А. Обоснование применимости гибридных силовых установок на летательных аппаратах различного типа и назначения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 148–157. DOI: 10.34759/vst-2023-2-148-157
 18. Зубко А.И., Лукин В.А., Герман Г.К. Разработка мероприятий по уменьшению сил сопротивления при работе подшипников качения // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 125–137. DOI: 10.34759/vst-2022-4-125-137
 19. Семенова А.С., Кузьмин М.В., Леонтьев М.К. Оценка долговечности межроторного подшипника по контактными напряжениям смятия // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 138–150. DOI: 10.34759/vst-2022-4-138-150
 20. Семенова А.С., Кузьмин М.В. Отработка методики численного анализа напряжений смятия в роликовых подшипниках // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 180–190. DOI: 10.34759/vst-2022-3-180-190
 21. Балакин Д.А., Зубко А.И., Зубко А.А., Штыков В.В. Вибрационная диагностика технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей с помощью ритмограмм и скаттерограмм // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 151–162. DOI: 10.34759/vst-2021-4-151-162
 22. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 384 с.
 23. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 371–374.
 24. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. – М.: Машгиз, 1963. – 243 с.

References

- Zvonarev S.L., Zubko A.I. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3-3(34), pp. 16-22.
- Bychkov N.G., Klimov D.A., Myktybekov B., Nizovtsev V.E. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26030>
- Shirmanov V.M., Bogdanov V.I., Shchegoleva E.K. *Vestnik RGATA im. P.A. Solov'eva*, 2013, no. 3(26), pp. 76-79.
- Chubarov D.A., Budinovskii S.A. *Materialy Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Novye razrabotki v oblasti zashchitnykh, teplozashchitnykh i uprochnyayushchikh pokrytii dlya detalei GTD" (28 September 2016; Moscow)*. Moscow, VIAM NITs "Kurchatovskii institut", 2016, p. 15.
- Wang L., Wood R., Powrie G. et al. Performance evaluation of hybrid (ceramic on steel) bearings with advanced aircraft engine oils for lubrication. *ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air (14-17 June 2004; Vienna, Austria)*. Vol. 2, pp. 117-126. DOI: 10.1115/GT2004-53418
- Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2010, vol. 224, no. 1, pp. 81-89. DOI: 10.1243/13506501JET570
- Kritskii V.Yu., Zubko A.I. *Dvigatel'*, 2013, no. 3(87), pp. 24-26.
- Zubko A.I., Dontsov S.N. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49296>
- Petrov N.I., Lavrent'ev Yu.L. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2015, vol. 14, no. 3-1, pp. 228-237. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-228-237
- Zaretsky E.V., Chiu Y.P., Tallian T.E. Ceramic bearings for use in gas turbine engines. *American Society of Mechanical Engineers*, 1989, vol. 11, pp. 237-253. DOI: 10.1007/BF02834841
- Khramin R.V., Kikot' N.V., Lebedev M.V., Burov M.N. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98896>
- Petrov N.I., Lavrent'ev Yu.L. *Prochnost' i nadezhnost' gazoturbinykh dvigatelei: Sbornik statei*. Moscow, TsIAM im. P.I. Baranova, 2020, pp. 260-266.
- Zhao X.Z., Liu J.J., Zhu B.L. et al. Friction and wear of Si3N4 ceramic/stainless steel sliding contacts in dry and lubricated conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1997, vol. 6(2), pp. 203-208. DOI: 10.1007/s11665-997-0015-2
- Kato K. Tribology of ceramics. *Wear*, 1990, vol. 136, no. 1, pp. 117-133. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90075-1
- Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. et al. *Osnovy tribologii: trenie, iznos, smazka (Fundamentals of tribology: friction, wear, lubrication)*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 2001, pp. 270-349.
- Sychev A.V., Balyasnyi K.V., Borisov D.A. Hybrid power plant employing electric motor and an internal combustion engine with a common drive to the propeller. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 172-185. DOI: 10.34759/vst-2022-4-172-185
- Bondarenko D.A., Ravikovich Y.A. Hybrid power plants applicability substantiation on various types and purpose aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 148-157. DOI: 10.34759/vst-2023-2-148-157
- Zubko A.I., Lukin V.A., German G.K. Development of measures for resisting forces reduction while roller bearings operation. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 125-137. DOI: 10.34759/vst-2022-4-125-137
- Semenova A.S., Kuz'min M.V., Leontiev M.K. Durability evaluation of the inter-shaft bearing by the contact bearing stress. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 138-150. DOI: 10.34759/vst-2022-4-138-150
- Semenova A.S., Kuz'min M.V. Development of a method for numerical analysis of contact stresses in roller bearings. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 180-190. DOI: 10.34759/vst-2022-3-180-190
- Balakin D.A., Zubko A.I., Zubko A.A., Shtykov V.V. Vibration diagnostics of gas turbine engines bearing assemblies technical condition with rhythmograms and scatterograms. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 151-162. DOI: 10.34759/vst-2021-4-151-162
- Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. *Sovremennye tekhnologii v poroshkovoii metallurgii (Modern technologies in powder metallurgy)*, St. Petersburg, Polytechnic University, 2010, 384 p.
- Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie (Materials Science)*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1980, pp. 371-374.
- Chernavskii S.A. *Podshipniki skol'zheniya (Sliding bearings)*. Moscow, Mashgiz, 1963, 243 p.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 05.10.2023.

The article was submitted on 11.09.2023; approved after reviewing on 03.10.2023; accepted for publication on 05.10.2023.