

УДК 621.452.3.03:621.822.6

В.Н. ДОЦЕНКО, С.В. НИКИТИН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ
ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

Проведен анализ опорных узлов высокоскоростных роторов с подшипниками скольжения или качения из стальных или керамических материалов с точки зрения возможности их использования для современных и перспективных авиационных ГТД. Отмечаются возможные преимущества и недостатки керамических или гибридных (из стали и керамики) подшипников качения и неоднозначность приведенных в литературе данных об их характеристиках. Разработана конструкция экспериментальной установки для проведения сравнительных испытаний стальных и керамических подшипников и методика их проведения.

опорный узел, авиационный двигатель, долговечность, керамический подшипник качения, гибридный подшипник качения, испытательный комплекс, сравнительные испытания

Наблюдающаяся в последнее время в авиадвигателестроении тенденция к увеличению удельной тяги приводит к уменьшению габаритов деталей и увеличению скоростей, при которых приходится работать роторным деталям, в том числе – подшипникам. Надежность двигателя в большой степени зависит от надежности опорных узлов, поэтому надежность подшипника играет важную роль для работоспособности всего двигателя. В двигателях последнего десятилетия подшипникам качения приходится работать на предельных для них числах скоростного параметра $dn=(2,0...3,0) \cdot 10^6$ мм·об/мин. При таких высоких уровнях параметра быстроходности приходится прибегать к различного рода конструкторским решениям для обеспечения высокого уровня долговечности и стабильности работы опор качения. В практике конструирования столь напряженных опор в машиностроении пошли двумя путями: усовершенствование обычных подшипников качения и замена подшипников качения подшипниками скольжения с газовой, жидкостной и реже магнитной рабочими средами.

Применение подшипников скольжения в авиадвигателестроении ограничено рядом причин:

1) высокая частота остановов и запусков дви-

гателя, что в связи с нестабильностью подшипников в переходных периодах снижает надежность опоры в целом;

2) относительная сложность узлов опор скольжения и системы подачи рабочей среды;

3) большая чувствительность опоры к изменениям в подаче рабочей среды, что приводит к усложнению системы подачи;

4) каждый подшипник скольжения уникален по своим характеристикам и поэтому требует индивидуального подхода в настройке и обслуживании;

5) производство подшипников скольжения требует наличия специальных высокоточных производственных мощностей, в то время как создание подшипников качения ведется на существующих специализированных массовых предприятиях.

В связи с вышесказанным подшипники качения по-прежнему преобладают в конструкциях авиационных двигателей. В результате возрастания скоростного параметра и нагрузок на подшипники выполнен ряд работ, связанных с улучшением их характеристик: разработаны и совершенствуются специализированные подшипниковые материалы; повышается точность изготовления деталей (точность и чистота поверхностей); разработаны и применя-

ются различные покрытия и методы обработки поверхностей для повышения их износостойкости и снижения трения при контакте с другими деталями; разработаны специальные формы дорожек качения для увеличения несущей способности подшипников и уменьшения потерь на трение при качении [1]; разработаны методы понижения массы тел качения; совершенствуются средства и способы охлаждения и смазки подшипников; повышается точность расчетов характеристик подшипников за счет учета большего числа факторов, которые оказывают на них влияние.

Применение керамических материалов для подшипников качения стало одним из возможных путей улучшения характеристик подшипников. Наибольшее распространение получили так называемые гибридные подшипники [2, 3], в которых кольца изготавливаются из общепринятых подшипниковых сталей, а тела качения – из керамики. Применение подшипников с керамическими кольцами ограничено сложностью финишной обработки керамических колец и сложностью монтажа подшипника на вал, а также достаточно низкой ударной вязкостью керамики. Керамические материалы обладают следующими особенностями по сравнению со сталью:

- низкая плотность (меньше на ~60%);
- высокий модуль упругости (больше на ~50%);
- химическая инертность в большом количестве агрессивных сред;
- коэффициент сухого трения в паре керамика-сталь меньше, чем в паре сталь-сталь [4];
- более низкий коэффициент теплового расширения и высокая теплоемкость и жаропрочность;
- керамика – диэлектрик;
- низкая ударная прочность.

Эти особенности обеспечивают ряд преимуществ керамики перед сталью при ее использовании в качестве материалов для тел качения подшипников:

- уменьшение центробежных сил [4];
- уменьшение потерь мощности на трение;

- увеличение срока службы смазочного вещества и тел качения в агрессивных средах;
- уменьшение предварительного натяга в подшипнике (до 33%[4]);
- полная электрическая изоляция внутреннего кольца от наружного;
- уменьшение радиального зазора в подшипнике;
- уменьшение рабочих температур подшипника;
- понижение вибрации и шума работы подшипника [5];
- возможность длительной работы при отсутствии смазки.

Из всех керамик наибольшее распространение получил нитрид кремния (Si_3N_4) [2, 4, 6 – 8]. Свойства нитрида кремния в сравнении с подшипниковой сталью приведены в табл. 1. Свойства шариков, изготовленных из различных керамических материалов, приведены в табл. 2.

Гибридные подшипники получили распространение в медицинском оборудовании, вакуумных насосах различного применения, космических аппаратах, пищевой промышленности, химической промышленности, сфере развлечений и спорте (роликовые коньки), в миниатюрных газотурбинных двигателях для авиамodelей [5, 7]. Многие производители подшипников качения (FAG, SKF, Voca Bearing Company, The Timken Company, NSK, SNFA, GMN, Torrington) в данный момент предлагают подшипники с керамическими телами качения.

В 2005 году компания Timken в рамках программы VAATE, посвященной оптимизации газотурбинных двигателей, получила два контракта на разработку гибридных подшипников для газотурбинного двигателя [9].

Однако до сих пор нет данных о применении гибридных подшипников в авиационных двигателях. Наиболее вероятной причиной этого является, на наш взгляд, недостаточность точной информации о влиянии преимуществ физико-механических

свойств керамики на долговечность подшипников. Существующая информация приводит большинство специалистов к выводу, что получаемые преимущества от применения гибридных подшипников не

окупают его высокую цену (действительно, цена серийного гибридного подшипника в 5 – 10 раз больше его аналога с металлическими шариками).

Таблица 1

Свойства подшипниковых материалов [5]

Материал	Модуль упругости ($\times 10^6$ PSI)	Плотность (Lbs/in ³)	Коэффициент Пуассона	Коэффициент линейного температурного расширения ($\mu\text{in/inch}/^\circ\text{F}$)	Твердость (HRC)	Предельная рабочая температура ($^\circ\text{F}$)
сталь AISI 440C (M&I)* (аналог 95X18Ш)	30	0,28	0,28	5,7	60 – 63	300
сталь AISI 440C (S&T)*	30	0,28	0,28	5,7	56 – 60	600
керамика	46	0,1156	0,26	1,7	78	2000
сталь AISI M50	30	0,288	0,29	6,6	61 – 64	650
сталь SAE 52100 (M&I) (аналог ШХ 15)	30	0,28	0,29	6,7	62 – 65	350
сталь SAE52100 (S&T)	30	0,28	0,29	6,7	58,5 – 65	390

*Обозначения фирмы Barden: M&I – Miniature& Instrument – миниатюрные подшипники и подшипники для измерительных средств ($d=4\dots 35$ mm); S&T - Spindle & Turbine – подшипники для шпинделей станков и турбомашин ($d=22\dots 290$ mm).

Таблица 2

Свойства шариков, изготовленных из различных керамических материалов [8]

Материал	Твердость по Роквеллу при 294 К	Предельная температура использования подшипника*, К	Плотность, г/см ³	Модуль упругости при 294 К, 10^9 Н/м ²	Коэффициент Пуассона	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Коэффициент теплового расширения при 273...1073 К, 10^{-6} м/К	Модуль Вейбулла**
						при 294 К	при 1073 К		
Кристаллическая стеклокерамика	53	> 644	2,5	87	0,25	1,6	2,0 при 873 К	0,4	3,3
Окись алюминия	85	~1367	3,9	350	0,25	7,2	1,7	8,5	2,7
Карбид кремния	90	< 1367	3,2	410	0,25	35	12	5	2,1
Карбид титана со связующим на основе никеля	67	< 867	6,3	390	0,23	14	6,8	10,7	1,4
Нитрид кремния	78	1367	3,11... 3,24	310	0,26	7,3	4,7	2,9	1,7

* Из условия сохранения твердости и опытных данных

** Из опытов по определению усталости элементов качения

Отсутствие конкретных рекомендаций по применению гибридных подшипников и расчету опорных узлов с ними в доступной отечественной и зарубежной литературе побудило нас совместно с опытно-конструкторским бюро ОАО «Мотор Сич» к подготовке сравнительных испытаний традиционных авиационных подшипников и их аналога с керамическими телами качения. Интерес ОАО «Мотор Сич» обусловлен тем, что на предприятии появилась необходимость в увеличении ресурса вспомогательной силовой

установки АИ-450МС, применяемой на ближнемагистральных самолетах АН-148. Одним из направлений работ по увеличению ресурса стало рассмотрение возможности замены серийного подшипника на его гибридный аналог. Это обусловило выбор типоразмера подшипников для испытаний. Основные параметры и условия работы подшипника ВСУ представлены на рис. 1.

Однако не следует воспринимать слова об отсутствии «доступных» рекомендаций в том смысле

ле, что работы по внедрению керамики в подшипники вообще и в том числе подшипники авиационных двигателей не ведутся.

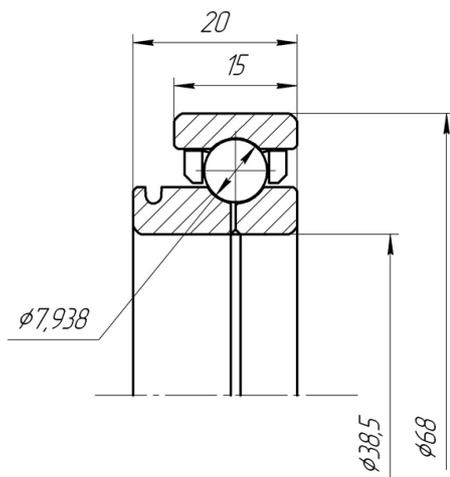


Рис. 1. Параметры и условия работы подшипника.

Условия работы:

- рабочие обороты 40000 – 55000 об/мин;
- нагрузка на один подшипник:
 - радиальная – 38 кгс,
 - осевая – 200 кгс;
- рабочая температура подшипника 250 °С

Первый опыт работы с подшипниками с шариками из нитрида кремния в литературе имеется в [4, 10]. Однако данные работы, судя по содержанию и прилагаемому обсуждению, не дают однозначных ответов на ряд важных вопросов. Эти работы подтверждают возможность уменьшения предварительного натяга до 30%, однако они расходятся в результатах исследований относительно потерь на трение (в [4] тепловыделение в гибридных подшипниках было заметно меньше, чем в обычных, а в [10] отличие в тепловыделении было незначительно, зато момент трения в гибридных подшипниках оказался больше почти на 20%). В [10] указывается, что усталостная долговечность гибридных подшипников не обнаруживает особых преимуществ перед обычными стальными подшипниками при работе до $dn = 3 \cdot 10^6$. Однако, дальнейшие работы во главе с Эрвином Зарецким (Ervin V. Zaretsky) по прогнозированию срока службы подшипников привели к тому, что была предложена идея пересмотра теории расчета срока службы на основе уравнения Лунберга-Палмгрена, и теоретически за-

креплено мнение о том, что полностью металлические подшипники при тех же условиях работы имеют больший срок службы, чем гибридные подшипники [6].

Однако, как показывает работа [11], в условиях смазки криогенными жидкостями гибридные подшипники имели больший срок службы, чем обычные подшипники из стали 440С. Особо удивили данные работы [12]: хотя подшипники с шариками из нитрида кремния и показали большее тепловыделение при работе подшипника в жидком азоте, однако после испытаний шарика не только не уменьшились, но и увеличились в размерах в среднем с 11,1150 мм до 11,1168 мм. Обзорные работы [2, 3] обобщают многие эксперименты, проведенные с гибридными подшипниками за последние десятилетия. В этих работах также приходят к выводу, что указанные подшипники обладают неоднозначными характеристиками. Гибридные подшипники смогут заменить обычные только в том случае, если они будут изначально проектироваться с учетом всех особенностей материалов подшипника и условий, в которых придется работать вновь созданным подшипникам. Это свидетельствует о том, что пока только натурные испытания помогут сделать окончательные заключения о применении гибридных подшипников в том или ином случае.

Для испытания подшипника был разработан испытательный комплекс, базовая конструкция блока испытываемых подшипников которого представлена на рис. 2.

Осевая нагрузка на подшипники создается с помощью пружины сжатия 14, что позволяет замыкать нагрузку внутри системы и поровну распределять ее между подшипниками, нагрузка остается неизменной в допустимых нормах и не зависит от внешних энергоисточников. Пределы нагружения ограничены только конструкцией пружины. Однако в таком случае теряется возможность целенаправ-

ленно изменять нагрузку в процессе испытаний. При необходимости такая система нагружения с минимальными изменениями в конструкции может быть заменена на систему с внешним нагружением с помощью пневмо- или гидроцилиндра. Контроль нагрузки осуществляется по степени обжатия пружины. Радиальная

нагрузка создается с помощью своеобразного пневмостатического подшипника. Контроль нагрузки осуществляется по давлению воздуха в системе. Максимально создаваемая нагрузка на один подшипник – 60 кг, при давлении воздуха в системе 5,85 кгс/см².

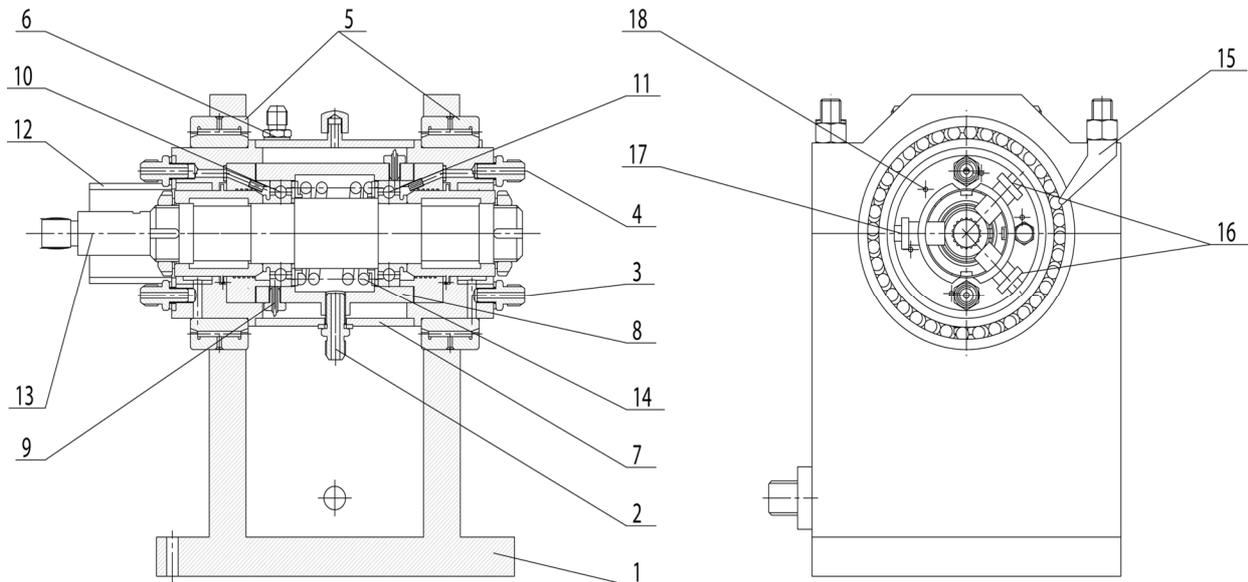


Рис. 2. Блок испытываемых подшипников:

- 1 – корпус блока подшипников; 2 – отвод масла; 3 – подвод воздуха для создания радиального усилия;
 4 – подвод масла; 5 – опорные подшипники; 6 – штуцер подвода воздуха на подогрев подшипников;
 7 – кожух подогрева; 8 – корпус подшипников; 9 – термопара; 10, 11 – испытываемые подшипники;
 12 – корпус датчиков; 13 – вал; 14 – пружина; 15 – фиксатор; 16 – датчики колебания ротора;
 17 – датчик измерения частоты вращения

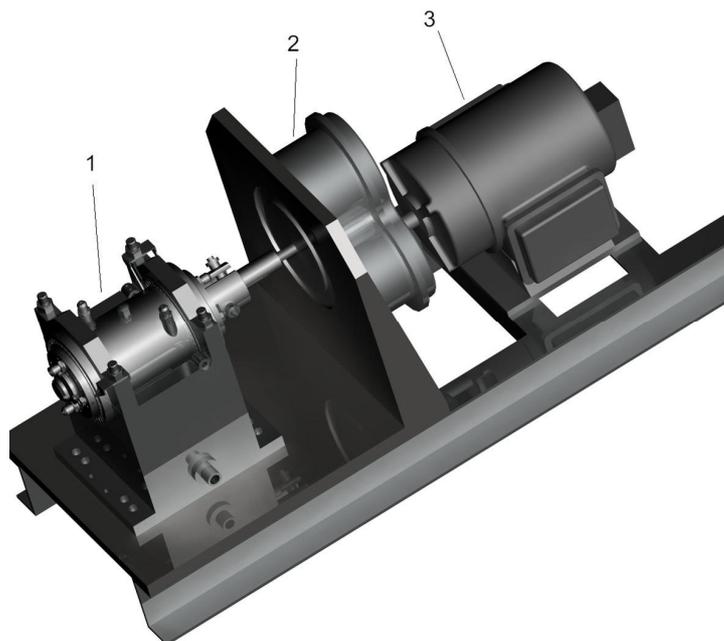


Рис. 3. Установка для испытания подшипников:

- 1 – блок испытываемых подшипников; 2 – мультипликатор; 3 – электродвигатель

Смазка осуществляется с помощью струи масла, подаваемой через жиклеры отдельно к каждому подшипнику (подача осуществляется в зазор между сепаратором и внутренним кольцом подшипника). Отвод масла от подшипников – общий через штуцер 2. Система смазки – замкнутая, циркуляционная, раздельная для испытываемых подшипников и подшипников мультипликатора. Температура масла контролируется с помощью термодатчиков на входе в подшипники и на выходе из корпуса блока подшипников. Принудительный подогрев масла отсутствует. Очистка масла производится с помощью 10-микронного фильтра. Для смазки подшипников предполагается применять синтетическую углеводородную смазку Turbonicoil 210A или ИПМ-10.

Корпус подшипников 8 обдувается воздухом, поступающим через штуцер 6. Подаваемый воздух позволяет дополнительно охлаждать или нагревать подшипники. Есть возможность контролировать тепловой поток от подшипников через корпус блока подшипников по разности температур входящего и выходящего воздуха. Контроль температуры осуществляется термодатчиками. Воздушная система обдува корпуса подшипников независима от системы создания радиальной нагрузки.

Температура наружных колец подшипников контролируется с помощью термодатчиков 11.

Контроль частоты вращения вала установки производится с помощью индуктивного датчика 17. Два дополнительных индуктивных датчика 16 позволяют фиксировать колебания вала.

Блок испытываемых подшипников установлен в корпусе 1 роликовых подшипниках 5, что позволяет непосредственно измерять момент сопротивления в паре исследуемых подшипников. Фиксаторы 15 предотвращают осевое перемещение наружных колец подшипников.

Привод блока испытываемых подшипников осуществляется от электродвигателя 1 через мультипликатор 2 (рис. 3). Достижимая частота враще-

ния – до 40000 об/мин.

Таким образом, разработанная установка позволяет производить испытания радиально-упорных подшипников качения при наличии радиальной и осевой нагрузки, внешнем охлаждении или подогреве.

В процессе испытаний производится контроль и измерения:

- температуры наружного кольца подшипника;
- температуры масла на входе и выходе из подшипников;
- температуры воздуха на входе и выходе из установки;
- момента сопротивления вращения для пары подшипников;
- расхода масла через подшипники.

Проведение сравнительных испытаний гибридных подшипников и обычных серийных авиационных подшипников с металлическими шариками предусматривает решение следующих задач:

- определение тепловыделения в подшипниках при одинаковых условиях работы (нагрузка, смазка, температура окружающей среды) за счет определения температуры наружных колец подшипников;
- определение степени износа подшипников при одинаковых условиях работы в течение срока, равного назначенному сроку службы для серийного авиационного подшипника;
- определение потерь на трение за счет определения момента сопротивления, теплоотвода в масло и через корпус в обдувающий воздух при испытании пары гибридных подшипников и пары обычных подшипников;
- определение оптимальных условий смазывания, обеспечивающих минимальные потери на трение и оптимальное охлаждение гибридных подшипников;

- создание рекомендаций по целесообразности применения гибридных подшипников;
- создание рекомендаций по применению гибридных подшипников, а именно: методики определения оптимального расхода смазки, оптимального радиального зазора подшипника (исходя из тепловых условий и учета особых физико-механических свойств материалов подшипника).

Литература

1. Пинегин С.В., Орлов А.В., Табачников Ю.Б. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой: Справочник.– М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
2. Wang L., Snidle R.W. and Gu L. Rolling Contact Silicon Nitride Bearing Technology: A Review of Recent Research // *Wear*. – 2000. – № 246. – P. 159-173.
3. Chao L.Y., Shetty D.K., Adair J.H. and Mecholsky, J.J. Jr. Development of Silicon Nitride for Rolling-Contact Applications: A Review // *Jour. Materials Education*. – 1997. – № 17. – P. 245-303.
4. Редклиф Вэлори. Характеристики быстрогоходного упорного шарикового подшипника с шариками из нитрида кремния // *Проблемы трения и смазки*. – 1976. – № 4. – С. 75-87.
5. Specialty Products Catalog, The Barden Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bardenbearings.com/PDF%20CD/USSPECIA.PDF>.
6. Erwin V. Zaretsky, Brian L. Vlcek, and Robert C. Hendricks. Effect of Silicon Nitride Balls and Rollers on Rolling Bearing Life. – Technical Memorandum NASA/TM-2005-213061, NASA, Cleveland, Ohio. – 2005. – 30 p.
7. Сайт фирмы Boca Bearing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bocabearings.com>.
8. Зарицкий Е.И. Керамические подшипники для газотурбинных двигателей // *Современное машиностроение*. – Сер. А. – 1989. – № 1. – С. 149-159.
9. Новости сайта фирмы «Евротрейд» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eurotrade-moscow.ru/news_view.phtml?id=6.
10. Паркер Дж., Зарецкий Е.И. Усталостная прочность высокоскоростных шариковых подшипников с шариками из нитрида кремния // *Проблемы трения и смазки*. – 1975. – № 3. – С. 11-20.
11. Gibson H.G. An Evolution of Bearings Operating in a Cryogenic Environment with Silicon Nitride Rolling Element. – Technical Memorandum NASA/TM-103524, NASA, Marshall Space Center, Alabama. – 1991. – 20 p.
12. Jett T., Hall P., and Thom R.. Evaluation of Bearing Configuration Using the Single Bearing Tester in Liquid Nitrogen. – Technical Memorandum NASA/TM-103527, NASA, Marshall Space Center, Alabama. – 1991. – 85 p.

Поступила в редакцию 26.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Олейник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.