

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ АВИАЦИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ОПОР РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Василий Юрьевич Критский,

заместитель главного конструктора "Опытного конструкторского бюро им. А. Люльки", филиала ОАО "УМПО"

Алексей Игоревич Зубко,

инженер-конструктор "Опытного конструкторского бюро им. А. Люльки", филиала ОАО "УМПО",

соискатель Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой возможности использования керамических подшипников скольжения в опорах газотурбинных двигателей. Приводятся результаты экспериментальных работ.

The possibility of using of ceramic glide-bearings in the supports of gas-turbine engines is studied in this article. The results of the experimental works are presented.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, подшипники скольжения, спектральный (орбитальный) анализ вибрации.

Keywords: gas-turbine engines, bearings, spectral (orbital) vibration analysis.

Из уравнения существования летательного аппарата следует вывод о том, что для решения перспективных задач завтрашнего дня в части создания самолетов с высокими показателями эффективности требуются увеличение удельной тяги двигателя и снижение удельного расхода топлива (что позволит при прочих равных условиях снизить его запас на борту). Это заставляет разработчиков силовых установок предусматривать все более высокие значения газодинамических параметров рабочего цикла двигателя и, в частности, стремиться к уменьшению аэродинамического сопротивления элементов газоздушного тракта путем сокращения числа рабочих ступеней лопаточных машин, более совершенного профилирования их элементов, повышения рабочих частот вращения роторов и т.д.

Однако при более высоких оборотах роторов резко увеличиваются нагрузки на все детали двигателя, особенно на элементы роторных систем. Это вызвано, прежде всего, зависимостью сил, возникающих из-за дисбалансов, от квадрата частоты вращения, ростом давлений и скоростей в критических сечениях двигателя и, в связи с этим, ростом сил реакции, которые полностью или частично передаются на корпус двигателя через опоры. 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.

Уже сегодня у серийно выпускаемых двигателей долговечность подшипников приближается к верхнему теоретическому пределу. 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 увеличения качества изготовления подшипников качения или применением подшипников других типов.

Работы по совершенствованию подшипников качения ведутся по различным направлениям уже не один год, но реальных результатов, обеспечивающих значительное увеличение их работоспособности, пока не отмечено. Виной этому многие проблемы, начиная от качества изготовления материалов для изготовления деталей и заканчивая технологическими возможностями производства, не позволяющими достичь требуемых результатов. Поэтому в ОКБ им. А. Люльки была предпринята попытка оценить возможность применения керамических подшипников скольжения нового поколения в конструкции опор газотурбинных двигателей (ГТД).

Подшипник скольжения, появившийся намного раньше подшипника качения, уступил место последнему во многих технических устройствах. Это произошло вследствие выявившегося основного преимущества подшипников качения - низкого коэффициента трения, поэтому такие подшипники характеризуются меньшими потерями механической энергии и более высоким к.п.д. Но наряду

с этими достоинствами подшипникам качения присущи и существенные недостатки, к которым можно отнести высокую чувствительность к чистоте и качеству смазки, большее количество деталей в их конструкции, и соответственно, меньшую надежность, меньшую устойчивость к внешней вибрации и т.д.

В настоящее время появились новые керамические материалы, которые могут быть использованы для изготовления подшипников скольжения. В таких подшипниках удается резко уменьшить коэффициент трения в рабочей паре и получить величину потерь близкую к подшипникам качения. Таким образом, применение подшипников скольжения позволяет получить более высокие результаты при оценке параметров газотурбинного двигателя в целом.

В состав металлокерамических материалов входят металлический порошок с добавлением присадок в виде карбидов, нитридов, металлов и неметаллов в различных соотношениях. Получаемые спеканиями при температурах около 1000...2000 °С и удельных давлениях от вакуума до 7000 кг/см² и более, они не содержат в своем составе дорогостоящего вольфрама. Керамические материалы могут иметь высокую, на уровне микроструктуры, пористость (от 15 до 35 %). С увеличением пористости механические свойства получаемых материалов и, соответственно, изготовленных из них деталей ухудшаются. Поэтому для обеспечения требуемых качеств керамических материалов необходимо проводить поиск компромиссов в части выбора размеров частиц структуры, элементов входящих в состав присадок и их пропорций.

Необходимо отметить, что под одним названием керамических материалов могут выпускаться десятки их разновидностей, имеющих различные составы и свойства. Для сравнения в таблице 1 приведены обобщенные данные по конструкционным материалам подшипников.

До появления композиционных керамических материалов нового поколения на основе карбида кремния, карбонитрида титана т.д., которые обладают низким коэффициентом трения, использование подшипников скольжения в конструкции опор роторов ГТД было невозможно из-за напряженных условий их работы в такой конструкции. Например, расчетные значения удельной нагрузки для подшипника скольжения межроторной опоры турбины высокого давления ГТД должны составлять до 17 кгс/см² при окружной скорости в зоне контакта поверхностей скольжения до 40 м/с. Для ранее применявшихся конструкционных материалов подшипников скольжения, где использовались пары трения чугун - бронза, при удельной нагрузке в 20 кгс/см² предельная скорость не превышала 1 м/с. Это значительно меньше необходимых значений параметров.

Результаты сравнения значений показателей, характеризующих свойства материалов, которые традиционно используются в конструкции подшипников скольжения (чугун, бронза, баббиты, капрон и т.д.) и керамики нового поколения позволяют утверждать, что последние обладают более высокой твердостью и коэф-

Свойства материалов для изготовления подшипников

Материал	Модуль упругости, МПа	Плотность, г/см ³	Коэффициент Пуассона	Коэффициент линейного расширения	Твердость (HRC)	Предельная рабочая температура, °С
Сталь 9Х18Ш	30	7,8	0,28	5,7 10 ⁶	61	300
Карбид кремния	330	3,1	0,2	4,4 10 ⁶	90	1400
Оксид алюминия	370	3,9	0,22	9 10 ⁶	92	1950
Нитрид кремния	320	3,2	0,26	3,2 10 ⁶	80	1400
Оксид циркония	200	6,1	0,3	11 10 ⁶	76	1200
Сталь ВКС5	210	7,8	0,3	12 10 ⁶	61	280
Композиты на основе карбонитрида титана	490	5,5...8,5	-	11...12 10 ⁶	92	1050
Композиты на основе карбида кремния	до 400	Около 3,0	-	3,6 10 ⁶	94	1250



Рис. 1. Структура материала многослойной панели

фициентом теплопередачи, меньшим удельным весом, коэффициентом термического расширения, близким к стали, и, что самое важное, - значительно более низким коэффициентом трения.

Варьируя составом компонентов и свойствами изготавливаемых керамических материалов, можно добиться получения не только работоспособных в условиях ГТД керамических подшипников скольжения, но и получить лучшие рабочие характеристики по сравнению с аналогичными характеристиками металлических и гибридных подшипников качения:

- 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.

Опоры скольжения изнашиваются сильнее всего при работе без смазки (при начале вращения опоры на этапе запуска двигателя) или в условиях ее недостаточного количества, т.е. в условиях граничного трения, когда выступы шероховатостей одной из деталей касаются выступов шероховатостей другой детали. Поэтому значение коэффициента трения является главным критерием для оценки эффективности работы подшипника, так как от него напрямую зависит величина потерь в узле. Для обеспечения длительной работоспособности подшипника необходимо иметь как можно меньший коэффициент трения скольжения пары, а тепло, выделяющееся в зоне трения, должно легко отводиться в детали конструкции опоры и через них в окружающую среду. Высокая теплопроводность деталей из керамики позволяет реализовать все представленные выше требования.

Керамические конструкционные материалы позволяют изготавливать деталь из нескольких слоев с разными свойствами, что дает возможность интегрировать подшипник в узлы и сборочные единицы отдельных модулей газотурбинных двигателей. Для примера на рис. 1 приведен фрагмент образца многослойной конструкционной панели, разработанной фирмой "Диалпром" (Москва). Каждый из слоев имеет собственные, заданные разработчиком конструкции, уникальные свойства. Такое решение, благодаря соответствующему подбору характеристик материалов в зависимости от величины напряжений в каждом сечении, позволяет значительно уменьшить массу деталей при улучшении их прочностных свойств.

В то же время подшипники скольжения имеют и недостатки, которые необходимо учитывать при комплексной оценке всех факторов на этапе принятия решения об их использовании и, в частности:

- повышенные требования к соосности деталей подшипника;
- недостаточно исследованные склонности к автоколебаниям на некоторых режимах работы двигателя и подшипника.

Для оценки возможности реализации в конструкции опор роторов ГТД подшипников скольжения из керамических материалов нового поколения специалистами нашего предприятия были разработаны и испытаны варианты гладких гидродинамических керами-

ческих подшипников скольжения. Их геометрические характеристики были выбраны таким образом, чтобы обеспечивалась возможность их применение взамен роликового подшипника качения, применяемого в одном из серийных двигателей.

Исследования проводились на испытательном стенде подшипников ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", где для получения и анализа параметров работы подшипника были дополнительно установлены датчики температур на наружной поверхности внутренней втулки подшипника скольжения и масла на входе и выходе в экспериментальный узел. В процессе проведения испытаний проводился мониторинг вибросостояния подшипника. Для этой цели использовался анализатор спектра и комплект программного обеспечения "Sirius" фирмы DeweSoft с датчиками вибрации типа 4513 фирмы В&К. Средствами вибродиагностики определялись режимы, на которых появлялось граничное трение. Также проводился "орбитальный анализ" движения центров валов, что позволило визуализировать характер движения ротора, его колебания, прецессии и т.д. Общий вид собранного экспериментального подшипникового узла стенда показан на рис. 2.

В качестве одного из критериев для сравнения подшипников был выбран расчетный коэффициент потерь в рабочей паре. Как известно, эффективность любого механического устройства можно оценить величиной потерь. В нашем случае под потерями понимается величина механической энергии, перешедшей в тепловую. Измеряя температуру колец и разность температур теплоносителя (масла) на выходе и входе в подшипниковый узел, его количество (определяется по измеряемому расходу в единицу времени) и полученный из справочных таблиц коэффициент его теплоемкости, можно вычислить количество выделившегося и переданного маслу тепла.

Необходимо отметить, что коэффициент потерь, вычисленный таким образом, имеет погрешности из-за отсутствия учета количества тепла, переданного более холодным деталям стенда, а также количества тепла, выделившегося при трении стеновых деталей и отданного в масло. Но так как испытания всех подшипников проходили на одном и том же стенде, величину погрешностей можно принять постоянной и для упрощения расчетов не учитывать.

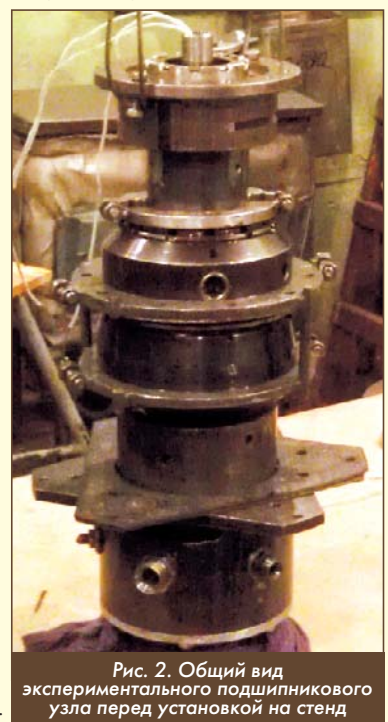


Рис. 2. Общий вид экспериментального подшипникового узла перед установкой на стенд

В ходе экспериментов были получены следующие зависимости, характеризующие работоспособность керамического подшипника скольжения:

- зависимость температуры деталей подшипника от величины радиальной нагрузки;
- зависимость разности температур деталей подшипника и температуры масла на его входе при различных частотах вращения;
- зависимость разности температур масла на выходе и входе подшипника от собственной частоты вращения подшипника.

Результаты экспериментов

Наилучшие показатели работоспособности подшипника скольжения достигнуты при использовании в паре трения керамики нового поколения (композит на основе карбида кремния с композитом на основе карбонитрида титана).

В ходе исследований оценивалась работоспособность подшипника скольжения при пониженных расходах масла. По сравнению с реализованным на сегодняшний день расходом масла в подшипниках качения опор турбины изделий "96ФП" и "99" он уменьшился в 60 раз.

Значения температуры, измеренной на поверхности внутренней детали керамического подшипника нового поколения, в зависимости от осевой нагрузки представлены на рис. 3. Заметим, что полученные зависимости необходимо анализировать с учетом особенностей конструкции стенда и системы сбора данных, вносящих собственные погрешности.

После начала испытаний с расходом масла 1 л/мин. произошла приработка рабочих поверхностей подшипника, поэтому количество выделяемого тепла было больше, а полученные температуры - выше (синяя линия), чем при расходе в 0,3 л/мин. (светло-зеленая линия).

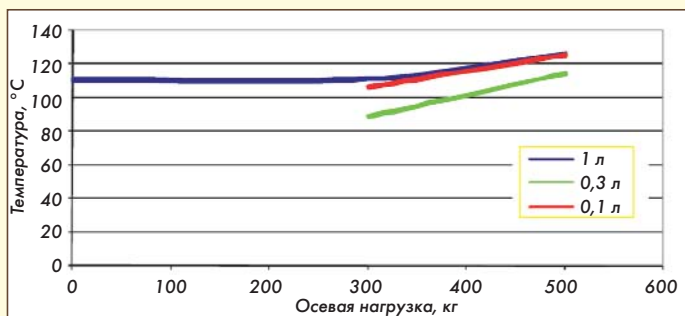


Рис. 3. Изменение температуры подшипника в зависимости от приложенных осевых нагрузок при постоянной частоте вращения 5900 мин⁻¹

Для имитации рабочих условий в опоре двигателя температура масла на входе в испытуемый подшипник (путем подогрева или охлаждения в системах стенда) поддерживалась на уровне 80...100 °С. Количество выделяемого тепла из-за гидрпотерь при трении слоев в масляном клине и трении между деталями подшипника можно оценить путем измерения разности температур деталей подшипника и масла на его входе (рис. 4).

Отсутствие на графике участков с высоким положительным градиентом и значениями температур свидетельствует о работоспособности экспериментального подшипника на режимах с расходами масла до 0,1 л/мин.

Температуры, измеренные на наружной поверхности деталей подшипника, имели максимальное значение, на 34 °С превышающее температуру масла на входе в подшипниковый узел. Допустимая расчетная разность данных температур была принята равной 80 °С. В результате испытаний зафиксирован более чем двукратный запас по данному критерию.

При проведении испытаний с расходом масла 0,1 л/мин., радиальной нагрузке 500 кгс и скорости скольжения около 40 м/с коэффициент потерь в металлокерамическом подшипнике скольжения, определенный расчетным путем, составил 0,018. Для роликового подшипника качения при таких же нагрузках и рабочих скоростях деталей, но при расходе масла 1 л/мин., расчетный ко-

эффициент потерь составил 0,02. Полученное более низкое значение расчетного коэффициента потерь у металлокерамического подшипника скольжения по сравнению с металлическими роликовыми подшипниками качения свидетельствует о его большей эффективности благодаря снижению энергетических потерь на трение и увеличению к.п.д.

Отмеченная в литературных источниках склонность гладких подшипников скольжения к возникновению автоколебаний "на масляном клине" при проведении серии экспериментов не проявилась. Возможно, условия их возникновения не были полностью смоделированы на испытательном стенде. Не исключено также, что высокоскоростной подшипник скольжения в ходе экспериментов работал на других режимах, за зоной возникновения автоколебаний.

При прохождении критических режимов ротора отмечался кратковременный всплеск уровня вибрации, не приводящий к развитию колебательных процессов, что свидетельствует о превалировании сил демпфирования над воздействием возмущающих сил. Но в областях, близких к критическим режимам, из-за изменения характера распределения нагрузок и режимов взаимодействия контактирующих поверхностей наблюдалось некоторое повышение тепловыделения, что вызвало смещение некоторых точек относительно расчетных (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость разности температур на поверхности подшипникового кольца и масла на входе в подшипниковый узел от величины расхода масла

В зонах, удаленных от критических режимов, отмечалась низкая виброактивность роторов. "Орбита" движения центра вала ротора на одном из таких режимов представлена на рис. 5. Перемещение центра вала ротора носит равномерный характер по окружности, близкой к эллиптической, с наклоном орбиты в вертикальной плоскости. Такая траектория движения свидетельствует об отсутствии колебательного процесса в системе и отсутствии проявлений нелинейных характеристик изменения жесткости опор исследуемых роторов.

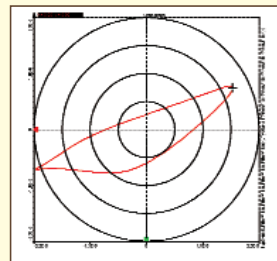


Рис. 5. Траектория движения ("орбита") центра вала подшипникового узла

Вывод

Конструкция гидродинамического гладкого подшипника скольжения из керамических материалов нового поколения подтвердила работоспособность в условиях работы в составе опоры ротора турбины ГТД при уменьшенных расходах масла до 0,1 л/мин. и радиальных нагрузках до 500 кгс.

Созданная конструкция не только не уступает, но и по некоторым параметрам превосходит характеристики аналогичных металлических роликовых подшипников качения, исследовавшихся ранее в таких же условиях на этом стенде.

Исследованные металлокерамические подшипники скольжения подтвердили работоспособность в условиях, характерных для работы межроторных подшипников ГТД.

Литература

1. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963, 245 с.

Связь с автором: iz59@yandex.ru