УДК 621.822

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

[1]Продан Н.В., [2]Булат М.П.

[1]ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашины», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru;
[2]ЗАО «Бизнес Компьютер Центр», Санкт-Петербург, e-mail: bulat_mh@mail.ru

В перспективных многорежимных летательных аппаратах планируется использовать комбинированные турбо-прямоточные и турбо-ракетные двигатели. Применение технологии бесконтактных опор позволит существенно повысить ресурс работы таких важных частей, как компрессоры и турбонасосные агрегаты. На данный момент в мире в авиакосмической технике наиболее распространены не газостатические, а газодинамические подшипники. Они характеризуются наличием поддерживающего слоя различных конструкций, который обеспечивает работоспособность роторов на запуске и остановке. Главная проблема подшипника данного типа помимо сложности конструкции состоит в изнашиваемости этого поддерживающего слоя. Газостатический подшипник лишен подобного недостатка, так как физический контакт твердых поверхностей между собой отсутствует. В данной статье приведены результаты расчета газостатического подшипника. Рассмотрены зависимости основных параметров от конфигурации опорной поверхности, а также исследована аэродинамическая устойчивость колодок на разных режимах работы.

Ключевые слова: газостатический подшипник, газодинамический подшипник, гибридный подшипник, колодка газостатического подшипника

OPTIMIZATION OF THE SUPPORTING SURFACES BEARING USING PRESSURIZED AIR

[1]Prodan N.V., [2]Bulat M.P.

[1]Problem Laboratory «Turbomachine» ltd, St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru;
[2]Business Computer Center ltd, St. Petersburg, e-mail: bulat_mh@mail.ru

In perspective multi-mode aircraft will use the combined direct-flow turbo and turbo-rocket engines. Application of the technology of air bearings will significantly improve the life of the important parts, like compressors and turbo pump assemblies. At this point in the world in the aerospace engineering the most common gas-dynamic bearings, not bearing with pressurized air. Gas-dynamic bearings are characterized by the backing of various designs, which provides performance rotors for starting and stopping. The main problem of this type of bearing, in addition to the complexity of design, is the limited durability of the backing layer. Bearing using pressurized air has no such defect, since physical contact between solid surfaces are missing. This article consists calculation results of the supporting surfaces bearing using pressurized air. The dependences of the main parameters of the configuration supporting surfaces of the shaft are considered as well as aerodynamic resistance of pads for different modes of operation.

Keywords: bearing using pressurized air, gas-dynamic bearing, hybrid bearing, bearing using pressurized air pad

В настоящей работе рассматривается саморегулируемый сегментный газостатический подшипник (ГСП). Повышенный по сравнению с газодинамическим подшипником (ГДП) расход воздуха удачно компенсируется в ГСП абсолютной пожаробезопасностью, а также ресурсом, не зависящим от числа стартов и торможений. Последнее объясняется тем, что подъемная сила, создаваемая поддувом газа под давлением, слабо зависит от частоты вращения вала. Вал может вывешиваться на воздушном подвесе, а уже затем раскручиваться. При торможении скорость вращения может быть погашена до нуля, после чего вал можно опустить на опору путём уменьшения давления поддува.

ГСП (рис. 1), как и любое техническое устройство, имеет заданные проектные характеристики. Наиболее важные из них:

– Грузоподъемность.
– Расход газа.
– Простота и удобство изготовления.

Именно эти характеристики и будут использоваться для сравнения при расчетах различных конструкций ГСП. В сегментном ГСП колодки могут поворачиваться относительно образующего вала, в результате ГСП обладает определённым запасом свойств саморегулирования по частоте вращения и радиальной нагрузке.

Предметная область

Предметная область – диаметры валов до 200 мм, обороты – до 50 тыс. об./мин, вес роторов – до 500 кг. При желании результаты можно распространить на большие параметры.

Сферы применения: авиация и транспорт вообще, турбоагрегаты, генераторы, компрессоры, насосы, турбо-насосные агрегаты ЖРД, системы вентиляции и кондиционирования, особенно транспортных объектов, центрифуги, сепараторы.

Показано экспериментально [6], что наибольшая жёсткость смазочного газового слоя и наименьший расход газа при заданной грузоподъёмности достигается при подаче воздуха в зазор через пористую

поверхность, когда диаметры подающих отверстий являются минимально возможными. Главная беда пористых вкладышей ГСП – нерегулярность характеристик после изготовления и в эксплуатации. Следовательно, необходимо найти иные оптимальные формы сопел, подводящих рабочее тело в зазор.

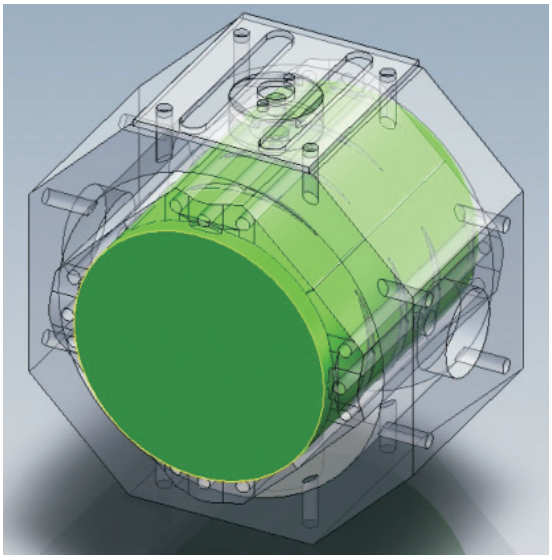

Рис. 1. ГСП с самоустанавливающимися сегментами опорной поверхности

Исследуемые схемы ГСП

Для исследования работы вкладышей были разработаны гильзы ГСП, позволяющие устанавливать 5 колодок, а также 4 колодки. Первый вариант кажется предпочтительным при использовании самоустанавливающихся вкладышей на агрегатах с вертикальным валом. Конструкция с 4 вкладышами является оптимальной на установках с горизонтальным валом. В данном случае одна пара колодок компенсирует вес ротора, а вторая в пределах запаса саморегулирования гасит его колебания.

Представляет определённый интерес технологически более сложный вариант ГСП с полноохватной промежуточной втулкой. Втулка может быть выполнена самоустанавливающейся либо управляемой с помощью САУ. За счёт отсутствия зазоров между колодками истечение в таком ГСП происходит только с торцов гильзы подшипника, поэтому при заданном расходе газа его грузоподъёмность выше.

Для изготовления вкладышей и системы подачи саморегулируемого ГСП необходимо выполнить следующие работы: определить оптимальную геометрию системы поддува, системы подачи, дросселирования и оптимального распределения рабочего газа по системе поддува, выбрать материала колодок (углекомпозит, карбид кремния, нанокерамика), параметрическое исследовать зависимости проектных параметров, заданных техническими требованиями, от параметров подачи газа и геометрии вкладыша с системой поддува.

Обзор литературы

Существует довольно ограниченный выбор литературы, посвященный проблеме ГСП. Основные публикации фундаментального характера относятся к 50–60-м годам. Из всех публикаций стоит отметить монографии Шейнберга С.А. [6] и Константинеску В.Н. [3]. В первой из них приведены практические рекомендации проектирования технических объектов, использующих ГСП и ГДП. Во второй – полные результаты аналитического и экспериментального изучения газового смазочного слоя, влияние таких свойств воздуха, как сжимаемость, силы инерции, турбулентность. Научные статьи, появляющиеся после 90-го года, в основном посвящены опорам валов судовых машин, роторов атомных реакторов и других тихоходных изделий с большой массой ротора. Множество работ описывают попытки численного расчёта смазочного слоя как в зазоре ГДП и ГСП, так и в гибридных подшипниках. Обзор истории развития методов проектирования ГСП приведен в работах [2, 4]. Современное состояние исследований и постановка задачи проектирования ГСП с учетом нестационарных явлений рассмотрены в работе [5].

Проведение параметрического анализа течения в зазоре между статором и ротором

При проектировании ГСП, а также при расчете жесткости смазочного слоя необходимо уметь задавать оптимальные значения базовых геометрических параметров, таких как:

1. Соотношение длины и ширины колодки.
2. Расположение отверстий поддува смазочного слоя.
3. Для щелевых сопел их расположение по направлению вращения или перпендикулярно ему, расстояние между соплами и от крайних сопел до торца колодки.

При заданной геометрии колодок целью параметрических исследований является выявление типичных зависимостей грузоподъемности колодки от давления, температуры и расхода рабочего тела.

В настоящей работе приведен параметрический анализ течения в зазоре между статором ГСП и ротором при заданном давлении поддува и переменном расходе, а также при фиксированном расходе воз-

духа и переменном давлении поддува для вкладышей следующих видов.

Исследование вкладышей неуправляемого газостатического подшипника методом численного эксперимента

Исследование модельных течений выявило, что геометрия системы, подводящей рабочее тело к парам трения, и геометрия системы сопел самих опор ГСП влияют на параметры смазочного слоя в значительной степени независимо друг от друга. Следовательно, их можно оптимизировать раздельно. Проведенное предварительное расчётное исследование зависимости грузоподъемности опор ГСП от сечения сопел, давления и расхода поддува выявило сложный характер этой зависимости. При некоторых сочетаниях размеров сопел с параметрами поддува наблюдаются «провалы» грузоподъемности.

Для проведения систематического численного эксперимента были подготовлены 3D-геометрии модельных колодок, а также опор – прототипов реальных пар трения перспективного ГСП. Выполнена дискретизация рабочей области, построены разностные сетки. Для учета всех факторов при составлении перечня расчетных конфигураций использовалась методика планирования многофакторного эксперимента. Для выявления генеральной параметрической зависимости грузоподъемности колодки от давления и расхода поддува, размеров, геометрии и взаимного расположения сопел на первом этапе использованы модельные конфигурации опор с тремя отверстиями, одним щелевым соплом и тремя щелевыми соплами. На втором этапе выполнялся расчет реальных колодок

Реальные колодки-прототипы

Для исследования геометрии системы сопел, которые могут быть использованы в прототипах опоры реального ГСП, были выбраны колодка с 30 простыми цилиндрическими соплами (рис. 2), колодка с системой из трех щелевых сопел (рис. 3) и колодка, у которой сопла замкнуты контуром (рис. 4). Поскольку в дальнейшем предполагалось исследовать различные уплотнения между сегментными опорами ГСП, то при расчёте ставилась задача обеспечить максимальное сопротивление перетеканию рабочего тела к торцам ГСП. Для этого щелевые сопла (бороздки) располагались по направлению вращения вала. В отличие от ранее исследованных опор, у которых высота бороздок была постоянной, по результатам предварительных расчетов была выбрана переменная высота сопел, что необходимо для обеспечения равной расходонапряжённости по образующей вала. Рабочее тело подаётся в центр каждого сопла.

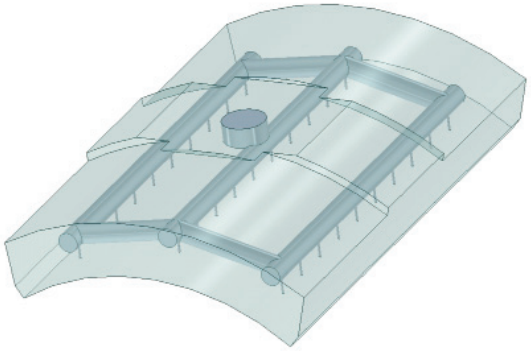

Рис. 2. Колодка с 30 цилиндрическими соплами

Рис. 3. Вид расчетной области для реальной колодки с 3 тангенциальными бороздками

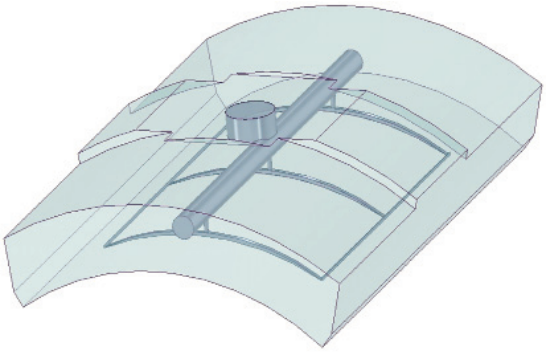

Рис. 4. Внутренние каналы и система опорных сопел колодки с замкунытм контуром

Сравнение колодки с тангенциальными бороздками и замкнутым контуром

Результаты расчетов использованы для разработки реальной колодки с замкнутым контуром. За основу принята колодка с оптимальным расстоянием между крайними тангенциальными бороздками. Выполнен-

ные расчёты показали увеличение грузоподъёмности более, чем на 10% при истечении через все 4 грани колодки (рис. 5) за счет более высокого уровня давления внутри контура по сравнению с колодкой-прототипом, не имевшей замкнутого контура.

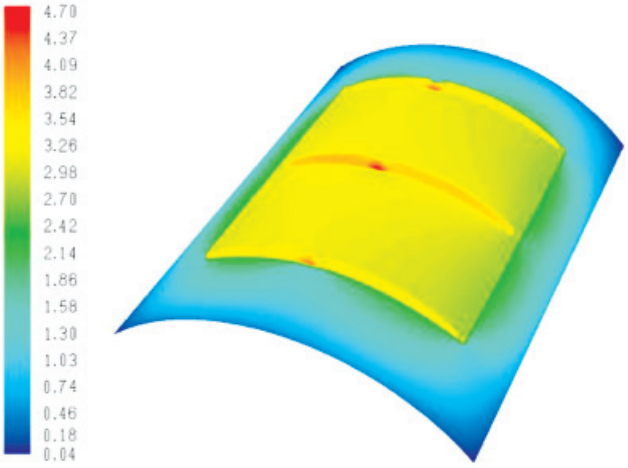

Рис. 5. Распределение давления при истечении через 4 грани колодки с контуром. Q = 12,5 г/с

Результаты расчетов

В ходе исследования были выявлены определяющие факторы, влияющие на грузоподъемность колодки. Значимым является изменение толщины смазочного слоя, которое определяет силу трения в зазоре, главным образом влияющую на грузоподъемность колодки.

При изменении толщины смазочного слоя имеются зоны нечувствительности, когда толщина зазора уменьшается, а грузоподъемность остается почти неизменной. Наличие таких зон является предпосылкой к аварийному касанию колодок вала. Эти же зоны провоцируют возникновение колебаний.

Помимо толщины смазочного слоя на силу трения также влияет непосредственно вязкость газа, которая, в свою очередь, зависит от температуры рабочего газа. Из теории известно, что с повышением температуры газа его вязкость растет, что, в свою очередь, приводит к увеличению грузоподъёмности. Однако, как показали расчеты, рост грузоподъемности за счет увеличения температуры оказался незначительным, так, при увеличении температуры на 100°С грузоподъемность увеличивается на 4%.

При рассмотрении колодки с системой простых отверстий большое значение имеет выбор диаметра подводящих отверстий. Для обеспечения максимальной грузоподъемности необходимо выбрать такой диаметр сопел поддува, чтобы истечение газа из отверстия было околокритическим, т.е. чтобы скорость газа в отверстии приближалась к скорости звука. При таком условии обеспечивается и наибольшая жесткость смазочного слоя.

Для реальной колодки с 3 тангенциальными бороздками рассмотрено влияние расстояния между бороздками на грузоподъемность колодки. При задании постоянного расхода существует оптимальное значение расстояния между крайними бороздками (0,65 длины для рассмотренной колодки), которое позволяет получить максимальную грузоподъемность. Оптимальное расстояние должно быть таким, чтобы обеспечить максимальную площадь повышенного давления на валу, но при этом исключить возможность истечения «не отработавшего» газа из крайнего сопла в окружающую среду.

Рассмотрено влияние зазора между колодками, через который осуществляется утечка рабочего газа. Грузоподъемность системы с 4-мя выходными границами на 31% меньше, чем системы с 2-мя выходными границами, при этом система с 4-мя выходными границами потребляет больше воздуха на 34%.

При сравнении колодки с системой отверстий и с щелевым соплом большую грузоподъемность при постоянном давлении показали колодки с щелевым соплом. Колодка с замкнутым контуром имеет преимущество перед колодкой с щелевыми соплами не менее чем на 20%. Опорная поверхность, образованная рядами близко расположенных отверстий, практически идентична колодке с щелевыми соплами. Если близко расположенные отверстия объединить канавками или контуром, то это не приводит к сколько-нибудь заметному увеличению грузоподъемности. Щелевые сопла, а также замкнутые контуры имеют не менее чем на 30% преимущество в грузо-

подъемности перед одиночными отверстиями. Поэтому целесообразно рассматривать замкнутые контуры в качестве технологически более простой альтернативы пористым колодкам. Щелевые сопла должны иметь переменную по длине сопла глубину. Максимальная глубина в месте подведения к соплу газа, минимальная – у края колодки. Внутри системы каналов не должно возникать областей отрывного течения со сверхзвуковыми скоростями потока.

Совместное моделирования сопел, смазочного слоя и системы подвода газа наталкивается на трудности методического характера. Течение в смазочном слое ламинарное, а в системе подвода рабочего газа – турбулентное. Возможен подход с применением пакетов, допускающих использование различных моделей турбулентности в разных областях течения, а также их полного отключения, например, ANSYS CFX, начиная с версии 11.0.

При расчете колодки на режимах околокритического течения по соплам можно также рекомендовать расчет в два этапа. На первом производится расчет всего течения с подходящей моделью турбулентности, например, Спаларта–Алмареса. На втором значения давления и расхода на входе в сопла используются в качестве граничных условий, а течение в смазочном слое рассчитывается по модели ламинарного течения.

Течения внутри каналов подвода газа являются низко-рейнольдсовыми, поэтому стандартные модели турбулентности, такие как к-ε, RNG к-ε, Realizable к-ε, не могут быть применены [1]. Следует использовать модели, специально разработанные для моделирования пристенных течений с низкими числами Рейнольдса, такие как модель Смагоринского, SST-модель, SA-модель.

Список литературы

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Особенности применения моделей турбулентности при расчете течений в сверхзвуковых трактах перспективных воздушно-реактивных двигателей // Двигатель. – 2012. – № 1. – С. 20–23.

2. Заблоцкий Н.Д., Сипенков И.Е., Филиппов А.Ю. К 50-летию школы газовой смазки Л.Г. Лойцянского // Научно технические ведомости 2’2004. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»).

3. Константинеску В.Н. Газовая смазка: пер. с рум. Г.П. Махо; под ред. М.В. Коровчинского. – М.: Машиностроение, 1968. – 712 с.

4. Проектирование гидростатических подшипников: пер. с англ. Г.А. Андреевой / под ред. Гарри Риппела. – М.: Машиностроение, 1967. – 135 с.

5. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник МАХ. – 2012. – № 3. – С. 3–7.

6. Шейнберг С.А. Опоры скольжения с газовой смазкой. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.

References

1. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Osobennosti primenenija modelej turbulentnosti pri raschete techenij v sverhzvukovyh traktah perspektivnyh vozdushno-reaktivnyh dvigatelej. Dvigatel’. no. 1, 2012. pp. 20. – 23.

2. Zablockij N.D., Sipenkov I.E., Filippov A.Ju. K 50-letiju shkoly gazovoj smazki L.G. Lojcjanskogo. Nauchno tehnicheskie vedomosti 2’2004 Problemy turbulentnosti i vychislitel’naja gidrodinamika (k 70-letiju kafedry «Gidroajerodinamika»).

3. Konstantinesku V.N. Gazovaja smazka. Perevod s rumynskogo Maho G.P., pod red. Korovchinskogo M.V., M.: Mashinostroenie, 1968, 712 p.

4. Proektirovanie gidrostaticheskih podshipnikov. Pod red. Garri Rippela. Perevod s anglijskogo G.A.Andreevoj. M.: Mashinostroenie, 1967, 135 p.

5. Uskov V.N., Bulat P.V. Ob issledovanii kolebatel’nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turboholodil’nyh i detandernyh mashin. Chast’ I. Postanovka zadachi. VESTNIK MAH, no. 3, 2012, pp. 3–7.

6. Shejnberg S.A. Opory skol’zhenija s gazovoj smazkoj, M.: Mashinostroenie, 1969, 336 p.

Рецензенты:

Усков В.Н., д.т.н., профессор кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета, математико-механический факультет; профессор-консультант кафедры плазмогазодинамики и теплотехники БГТУ «ВОЕНМЕХ», им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург;

Емельянов В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 04.02.2013.