

УДК 621.43; 621.822.6

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

© 2009 В. В. Макаrchук

Завод авиационных подшипников, г. Самара

В статье рассматриваются проблемные вопросы расчета, проектирования, изготовления и испытаний подшипников для авиационных газотурбинных двигателей.

Опоры роторов, подшипники качения, работоспособность

Подшипники качения аэрокосмического применения – изделия особого применения, при создании которых используются специальные методы проектирования, материалы и технология изготовления.

Еще в 90-х годах прошлого века в пособиях по проектированию газотурбинных двигателей (ГТД) можно было найти сетования на то, что конструирование подшипниковых узлов в большей мере относится к области искусства, чем науки, и что основным методом проектирования является копирование известных, надежно работающих конструкций. В то же время надежность подшипников роторов является важной составляющей надежной работы ГТД в целом (рис.1). При создании ГТД этому вопросу уделяется достаточное внимание на всех ступенях - от разработки и доводки вплоть до передачи в серийное производство.

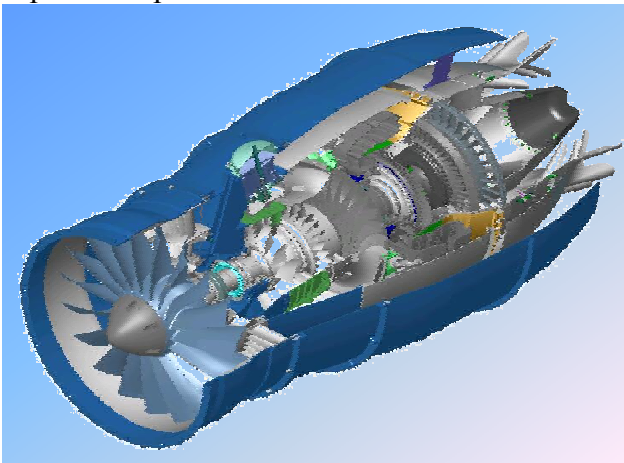


Рис.1. Газотурбинный двигатель

Такое положение вызвано хорошо известной сложностью рабочих условий подшипников ГТД по скоростям вращения, нагрузкам, рабочим температурам при жестких

требованиях к весу и габаритам, надежной работы на заданный ресурс, а также требований по экономичности, технологичности при серийном производстве и т.д.

Большое значение имеет понимание тонких особенностей работы подшипников в процессе эксплуатации, а также в ходе работ по повышению ресурса и разработки мероприятий с целью устранения выявленных при эксплуатации дефектов. Уровень современных требований к опорам роторов предопределяет проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований для определения наиболее оптимального варианта конструкции подшипника взамен стандартной «комплектующей детали» по каталогу, как это делалось раньше.

В силу этих обстоятельств, конструкция подшипникового узла должна являться разумным компромиссом указанных выше факторов. А для этого необходимо достаточно полное представление о взаимосвязи этих факторов, степени их важности в различных условиях применения подшипников в различных узлах ГТД.

Скорости вращения валов, повышенные с целью получения наибольшего к.п.д. компрессора, вызывают увеличение центробежных сил. При этом нагружаются больше дорожки качения наружных, а не внутренних колец. Вследствие этого создается опасность пробуксовывания тел качения, повышенного тепловыделения и в целом нестабильной работы. С целью достижения максимального к.п.д. термодинамического цикла ГТД повышаются рабочие температуры. Под действием высоких температур возникают изменения размеров деталей подшипника и со-

пряженных деталей, влияющие на работу подшипника.

Кроме того, недостаточная жесткость валов и корпусов опор является причиной работы подшипников с перекосом колец (рис.2). Это требует совершенствования внутренней геометрии подшипников, обоснованного назначения зазоров, профилирования образующих поверхностей роликов и колец роликоподшипников.

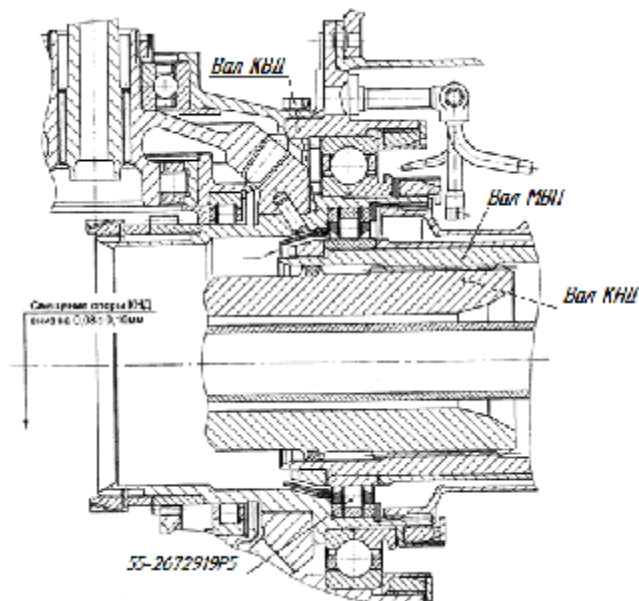


Рис.2. Узел межвального подшипника ГТД

Анализ тенденции проектирования подшипниковых узлов опор ГТД показывает, что в настоящее время требуются подшипники, способные надежно работать при значениях $dn = 3 \cdot 10^6$ мм·об/мин. выше (параметр скорости dn представляет собой произведение диаметра отверстия подшипника в миллиметрах на частоту вращения вала в оборотах в минуту). Поэтому за последние годы в области расчета и проектирования высокоскоростных подшипников было выполнено большое число работ как у нас в стране, так и за рубежом. В зарубежной печати сообщалось, об успешной работе шариковых подшипников при $dn = 3 \cdot 10^6$. Роликовые подшипники работали при dn до $3 \cdot 10^6$. В этом диапазоне dn исследования предсказывают недопустимое снижение долговечности из-за больших центробежных сил, развиваемых вращающимися деталями подшипника.

При таких скоростях, основными причинами выхода из строя являются не явля-

ния, связанные с контактной усталостью материала, а разрушение внутренних колец вследствие растрескивания, износа, поломки (реже выкрашивания) перемычек сепаратора, «задира» его центрирующих поверхностей, «раскатки» дорожек качения вследствие перегрева. Поэтому интенсивно проводятся работы, связанные с улучшением качества металла - получение мелкодисперстной микроструктуры, изготовление подшипников из цементуемых сталей (типа М50 NiL), изготовление колец с выкаткой желоба из трубной заготовки вместо вырезки из поковки, а также организации таких процессов финишной обработки, при которых на поверхностях колец образуются остаточные напряжения сжатия. Основные направления работ по уменьшению нагрузок на наружное кольцо - это применение тел качения из нетрадиционных материалов (металлокерамика, нитрид кремния), использование пустотелых тел качения, применение подшипников сверхлегких серий (рис.3), создание оптимальной внутренней геометрии шариковых подшипников с арочным профилем дорожек качения наружного кольца.



Рис.3. Межвальный роликовый подшипник

При решении вопросов проектирования подшипников для современных ГТД уже невозможно обойтись без применения ЭВМ и современных компьютерных программ ANSYS, CATIA и др. За рубежом, по рекламным данным, некоторые фирмы располагают сотнями программ для расчета подшипников качения, из литературных источ-

ников известно лишь немногие. Так, например, фирма FAG утверждает, что она располагает сетью связанных между собой вычислительных центров, расположенных в Германии, Англии, Канаде и США, и что для потребителей разработано свыше 200 программ для расчета подшипников.

В доступных литературных источниках описано несколько программ, которые для подшипника ротора ГТД позволяют проследить влияние отдельных факторов, таких как скорость вращения, величина осевой и радиальных нагрузок и их сочетание, величина угла перекося колец и рассчитать рабочие характеристики подшипника. В качестве входных данных в таких программах используются геометрические характеристики подшипника (такие как размеры, зазор, углы контакта), свойства материалов и смазки, а также условия окружающей среды.

Так, программы SHABERTH (SKF) и CYBEAN (NASA) разработаны применительно к расчету высокоскоростных роликовых подшипников с цилиндрическими роликами. Выходные данные включают значения нагрузок на ролики и контактных напряжений, компонент скорости, тепловыделений, местных температур, перекося роликов, состояние смазочной пленки в контактах, усилия взаимодействия роликов с сепаратором и направляющими бортиками, усталостной долговечности и потерь мощности. С помощью программы CYBEAN можно оптимизировать условия контакта и смазки торца ролика с направляющими бортиками колец и предотвратить стремление ролика к «рысканию» и последующему его развороту в гнезде сепаратора. Заметим, что дефект «разворот ролика» является одним из основных для роликовых подшипников опор роторов ГТД (рис.4).

Что касается высокоскоростных шариковых подшипников с арочным профилем дорожек качения, то практически (за небольшим исключением - работы Lewis Research Center, Кливленд, шт. Огайо) отсутствуют публикации по программам расчета подобным SHABERTH и CYBEAN.

Так, исследования по подшипникам с трехточечным контактом в Великобритании проводились по контракту с Министерством обороны. Эта работа привела к соглашению,

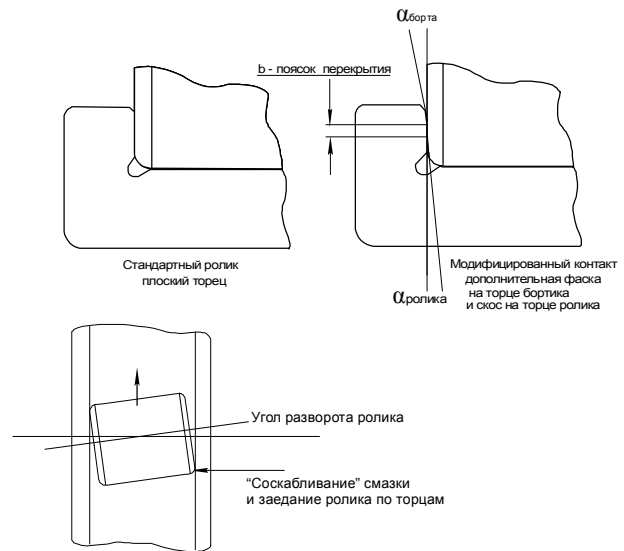


Рис.4. Схема контакта при развороте ролика

по которому фирма Ransme Hoffman Pollard Ltd стала единственным обладателем патентов на это изобретение с правом передачи лицензии другим компаниям при наличии разрешения Министерства обороны.

Методики расчета высокоскоростных подшипников разрабатывались во ВНИПП, в МФТИ, МВТУ им Баумана, Казанском и Самарском авиационных институтах, Пермском политехническом институте, СНТК им. Кузнецова (г. Самара), СПБ «Машпроект» (г. Николаев) и др.

Вместе с тем они, в основном, разрабатывались для решения специальных проблем (стабильность и величина момента трения, анализ вибрационного состояния узла, жесткостные характеристики и т.д.) и не отражают особенности работы подшипника в узле опоры ГТД. Поэтому в СКБ ОАО «ЗАП» ЕПК в последние годы с учетом накопленного опыта интенсивно разрабатываются программы по оптимизации конструктивных параметров шариковых и роликовых подшипников с учетом их работы в конкретном узле опоры ГТД [1].

Особенностью этих программ является учет геометрии деталей подшипника и подшипникового узла в рабочих условиях (за счет изменений геометрических размеров под действием центробежных, силовых и температурных деформаций), расчет сил трения и сил сопротивления вращению с учетом масляной пленки и анализ влияния производственных допусков на характеристики подшипника в целом (рис.5).

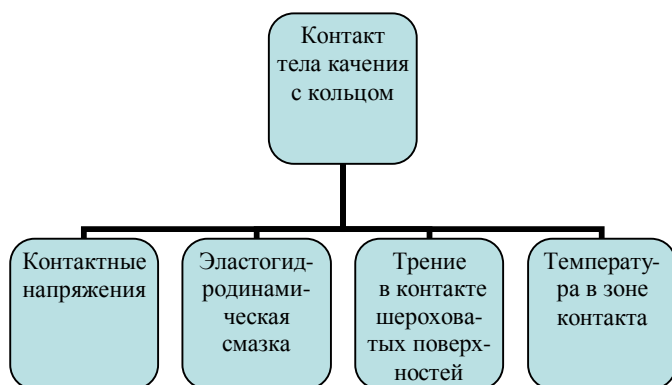


Рис.5. Схема расчета контакта

При этом расчеты долговечности подшипников в сложных условиях нагружения (центробежные силы, перекосы колец и т.п.) выполняются по базовым контактным напряжениям с учетом характеристик кривых контактной выносливости подшипниковых материалов (рис.6 и 7).

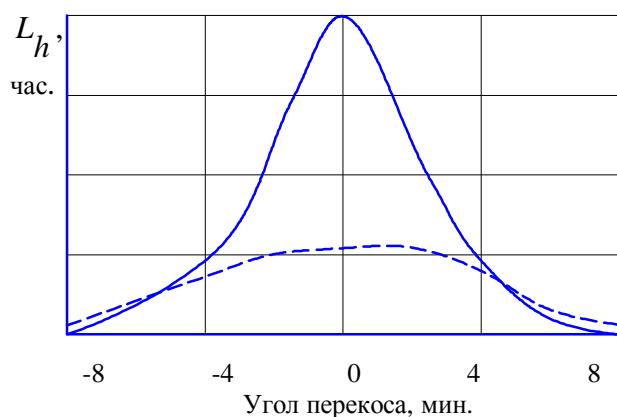


Рис.6. Долговечность арочного подшипника при перекосе колец

Одновременно развиваются и совершенствуются экспериментальная и технологическая база предприятия (рис.8).

Учитывая изложенное, основными направлениями деятельности ОАО «ЗАП» на ближайшие годы приняты:

1. Дальнейшее углубление и совершенствование методик расчета по оптимизации конструктивных параметров шариковых и роликовых подшипников опор ГТД.

2. Разработка методологии проектирования высокоскоростных подшипников качения с деталями из композиционных материалов.

3. Обоснование и применение средств мониторинга и раннего обнаружения дефектов подшипника в процессе эксплуатации;

прогнозирование остаточного ресурса подшипников.

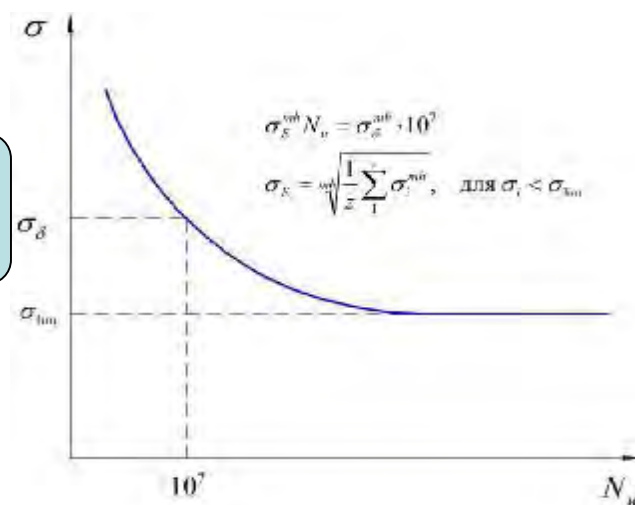


Рис.7. Кривая выносливости подшипниковых материалов



Рис.8. Лаборатория испытаний подшипников

4. Ежегодное освоение в производстве порядка 50 наименований новых типов подшипников (в том числе и совмещенных опор для ГТД последующих поколений).

Успешное решение задачи повышения работоспособности подшипников авиакосмических изделий требует постоянного сотрудничества нашего предприятия и авиапредприятий при создании новых изделий.

Библиографический список

1. Балякин В.Б., Жильников Е.П., Самсонов В.Н., Макарчук В.В. Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 254 с., ил.

References

1. Baljakin V. B., Zhilnikov E.P., Samsonov V. N., Makarchuk V.V. Theory and engineering bearing of rotors of aviation Gas Turbine En-

gines. – Samara: Publishing house of the Samara State Space University, 2007. – 254 p., il.

DEVELOPMENT STRATEGY OF DESIGN METHODS OF HIGH-SPEED BEARINGS OF AEROSPACE APPLICATION

© 2009 V. V. Makarchuk

Aviation Bearing Plant, Samara

In report are examined difficulties in calculation and designing, manufacturing and testing of backbone bearings of the aviation gas turbine engines.

Rotor supports, rolling bearings, workability

Информация об авторе

Макарчук Владимир Владимирович, инженер, исполнительный директор дивизиона специальных подшипников. Тел. (846) 312-26-71. Область научных интересов: подшипники авиационных двигателей.

Makarchuk Vladimir Vladimirovich, engineer, the chief executive of Special Bearings Division of Aviation Bearing Plant. Phone: (846) 312-26-71. Area of research: bearings of aerospace.