

УДК 62-233.2, 621.822

© А.С. АМЕЛЬКИН, Т.Н. КИЯНСКИЙ,
Ю.А. РАВИКОВИЧ, 2009

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ УЗЛА МЕЖРОТОРНОГО ПОДШИПНИКА НА НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМАХ

Андрей Сергеевич АМЕЛЬКИН родился в 1983 г. в городе Москве. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области конструирования и проектирования двигателей летательных аппаратов. Автор двух научных работ. E-mail: a-a-c@yandex.ru

Andrey S. AMELKIN, was born in 1983, in Moscow. He is Post-Graduate Student at the MAI. His scientific interests are in the design and development of aircraft propulsion systems. He has published 2 technical paper. E-mail: a-a-c@yandex.ru

Тимофей Николаевич КИЯНСКИЙ родился в 1954 г. в городе Макеевке Донецкой области. Начальник бюро НТЦ «МКБ «Гранит». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области обеспечения надёжности двигателей летательных аппаратов на стадии проектирования. Автор 10 научных работ. E-mail: granit@salut.ru

Timofey N. KIANSKY, Ph. D., was born in 1954, in the Donetsk Region. He is the Head of a Bureau at the «Granite» Moscow Design Bureau, Scientific and Technical Center (МКБ «Гранит»). His scientific interests are in the reliability-based design support of aircraft engines. He has published 10 technical papers. E-mail: granit@salut.ru

Юрий Александрович РАВИКОВИЧ родился в 1951 г. в городе Ленинграде. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области исследования и проектирования высокоскоростных турбомашин с подшипниками скольжения. Автор более 100 научных работ. E-mail: yurav@mai.ru

Yury A. RAVIKOVICH, D. Sci., was born in 1951, in Leningrad. He is the Head of a Department at the MAI. His scientific interests are in research and development of high-speed turbo-machines with friction bearing. He has published over 100 technical papers. E-mail: yurav@mai.ru

В настоящей статье описывается физическая модель работы межроторной опоры ротора турбины высокого давления (ТВД) авиационного двухконтурного двигателя на нерасчетных режимах. Рассматриваются возникновение первоначального повреждения межроторного подшипника (МРП), факторы, влияющие на степень первоначального повреждения, и возможные направления развития ситуации после образования дефектов.

This article describes the physical model of high pressure turbine intershaft bearing of aviation bypass engine working in off-design conditions. The origin of initial damage of the intershaft bearing, factors that influence the initial damage rate and probable consequences of the defect formation are considered.

Ключевые слова: межроторный подшипник, нерасчетные режимы, первоначальное повреждение, образование дефекта, контактные нагрузки, радиальный зазор подшипника, неравномерное сжатие

Key words: intershaft bearing, off-design conditions, initial damage, defect formation, contact loads, radial clearance of the bearing, irregular compression

Первоначальные повреждения межроторных подшипников

Размещение подшипника ротора высокого давления непосредственно на валу ротора низкого давления обусловлено стремлением к сокращению размеров обоих роторов двигателя в осевом направлении, что благоприятствует снижению массы элементов двигателя в целом и повышению изгибной жесткости роторов, а значит, и их вибрационных характеристик.

Однако часто подшипники, применяемые в таких опорах, оказываются критическим элементом, существенно ограничивающим ресурс всего ГТД и снижающим его надёжность. При этом дефект МРП проявляется спонтанно, практически не коррелируется ни с наработкой ГТД, ни с условиями его эксплуатации. Разрушение МРП происходит за время в несколько десятков секунд, а наступление его критического состояния не обнаруживается современными средствами диагностики. На первоначальной стадии образования дефекта межроторный подшипник приобретает характерные повреждения: на беговой дорожке наружной обоймы МРП и роликах образуются кольцевые следы микровыкрашивания.

Ролики приобретают незначительную конусность (рис. 1). Диаметр ролика со стороны правого торца на 0,001—0,002 мм больше, чем диаметр со стороны противоположного торца. При этом диаметр кольцевого следа микровыкрашивания роликов несколько больше, чем диаметр неповреждённой гладкой зоны. Это объясняется тем, что поверхность этой зоны «разрыхлена» микротрещинами в отличие от соседних гладких неповреждённых зон.

Поверхность беговой дорожки наружной обоймы так же приобретает незначительную конусность ~ 0,005 мм. Диаметр беговой дорожки по поясу, расположенному ближе к правому торцу несколько

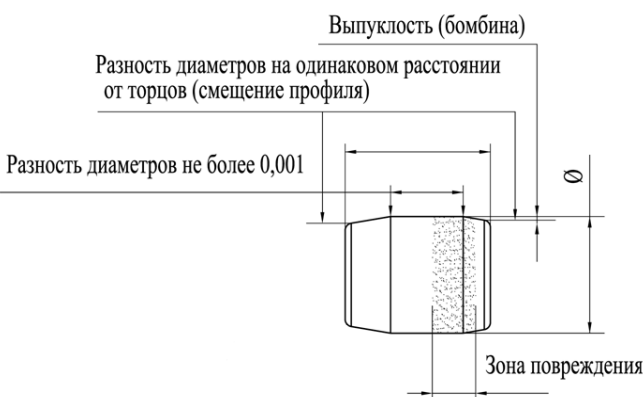


Рис. 1. Форма ролика и зона концентрации первоначальных повреждений

ко больше, чем с противоположной стороны. Зона качения роликов на беговой дорожке наружной обоймы представляет собой выпуклость над соседними поверхностями. Посадочный диаметр наружной обоймы увеличился в среднем на 0,004—0,005 мм, что является следствием остаточных напряжений сжатия в материале.

Диаметр внутренней обоймы практически не изменяется.

Повреждение подшипника представленного характера возможно при изменении формы корпуса, в который он установлен, под действием температурных потоков [1].

С целью определения формы посадочной поверхности подшипника и величины геометрических отклонений при температурных градиентах был проведен расчёт напряженно-деформированного состояния (НДС) цапфы турбины с применением метода конечных элементов. Модель выполнена на основе осесимметричных трех узловых Triangle конечных элементов при температурном воздействии в осесимметричной постановке. Температура T_2 на участке наружной поверхности цапфы варьируется в диапазоне 100—200 °С, а температура внутренней поверхности остаётся постоянной: $T_1 = 120$ °С (рис. 2). Вычислялись значения радиальных перемещений в узлах 1 и 2 посадочной поверхности подшипника.

Анализ конечно-элементной модели показал, что цапфа турбины претерпевает деформации с изменением диаметра и формы посадочной поверхности МРП. Из графика, изображенного на рис. 3, видно, что при увеличении температуры наружной поверхности цапфы радиальное перемещение узла 1 сильно возрастает, а узла 2 практически не меняется. Конусность при температурном градиенте $\Delta T = 75$ °С достигает более 0,03 мм (рис. 4, конусность вершиной направлена в сторону свободного конца цапфы турбины).

Сопоставление данных исследований с видом повреждений позволяет сделать вывод, что во время работы возникают условия, когда поверхность наружной обоймы становится конической, с направлением вершины конуса в сторону ТНД (рис. 5). При этом наружная обойма МРП испытывает сильное сжатие вплоть до появления радиального натяга между роликами и беговыми дорожками.

Влияние радиального люфта на долговечность подшипников известно. Зависимость имеет вид, показанный на рис. 6. [2]. На рис. 6 видно, что при уменьшении радиального люфта (движение вправо по оси абсцисс) долговечность подшипника мо-

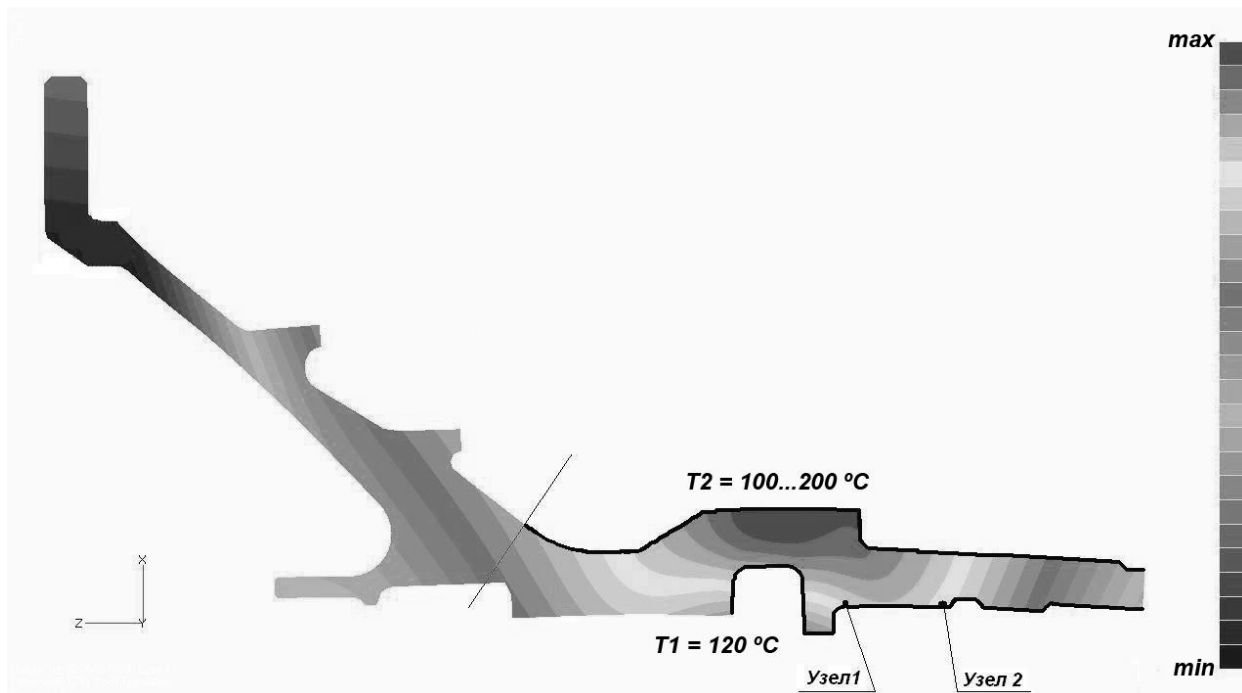


Рис. 2. Распределение радиальных перемещений в модели цапфы турбины

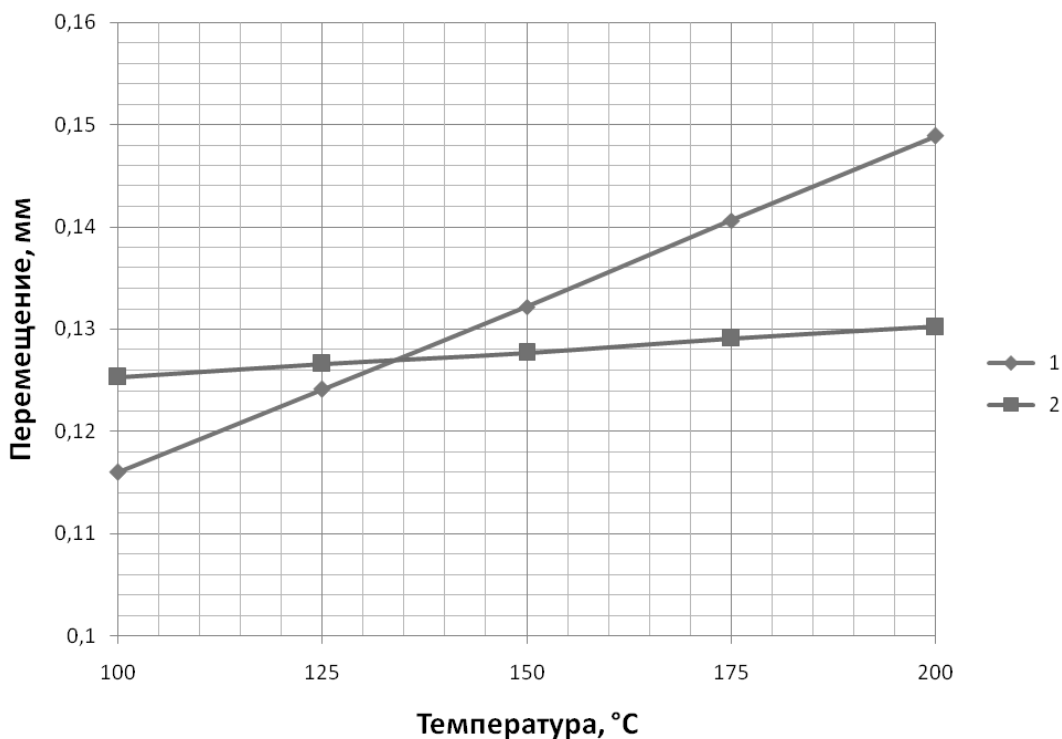


Рис. 3. Радиальные перемещения узлов цапфы турбины при температурных градиентах

нотонно растёт вплоть до небольших (0,01—0,02 мм) радиальных натягов. Однако дальнейший рост радиального натяга опасен резким падением долговечности подшипника вплоть до мгновенной потери работоспособности, когда долговечность устремляется к нулю.

Неравномерное трёхосное сжатие [3] обоймы подшипника приводит к резкому повышению полных напряжений в зоне контакта с роликами на

фоне больших общих напряжений сжатия. Несмотря на малую величину радиальной нагрузки, эти напряжения достигают предела контактной выносливости материала и приводят к образованию микротрещин в рабочих поверхностях беговой дорожки и роликов.

Анализ работы двигателя и его систем показал, что тепловые потоки могут возникать в цапфе турбины в начале всех режимов, сопровождающихся

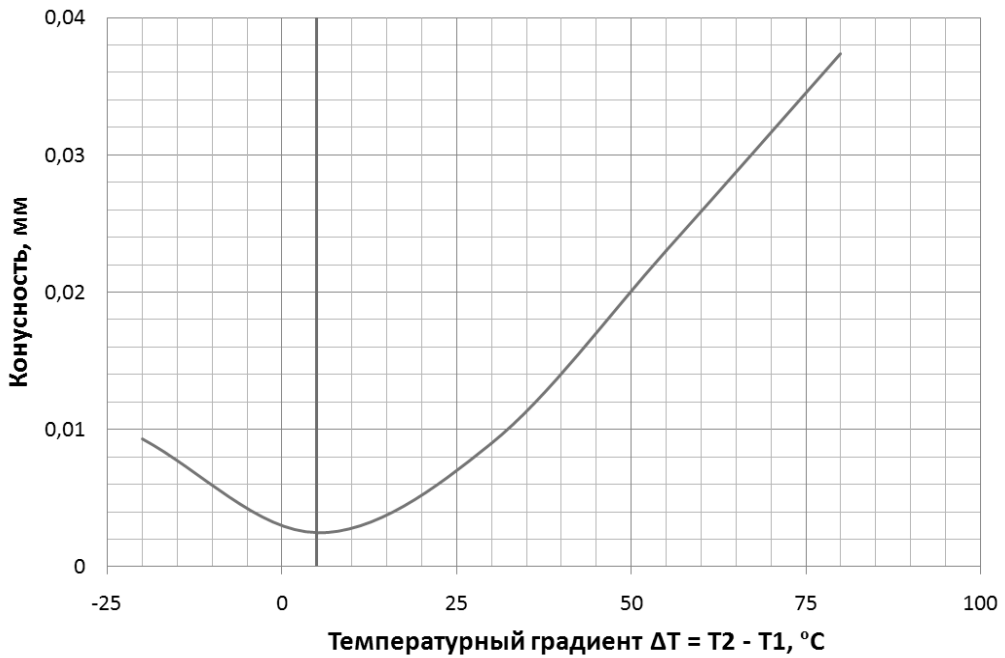


Рис. 4. Конусность посадочной поверхности подшипника при температурных градиентах

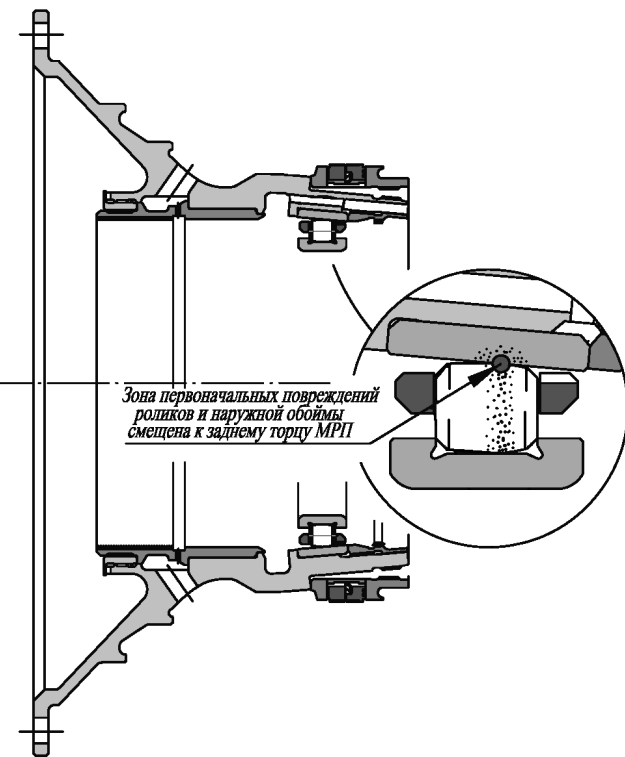


Рис. 5. Взаимное положение и деформации деталей МРП

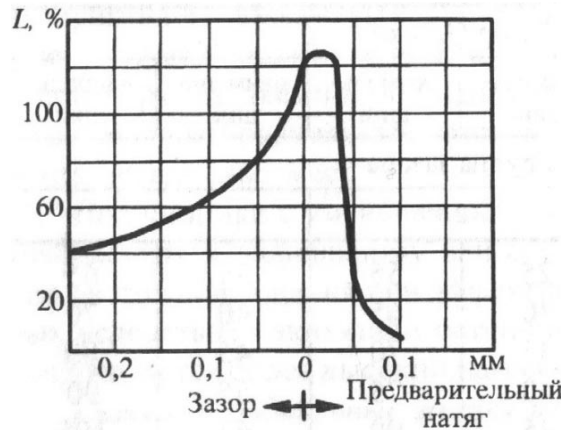


Рис. 6. Зависимость ресурса подшипника L от радиального люфта

увеличением перепада температур между диском ТВД и маслом, омывающих хвостовик цапфы ТВД, или ухудшением отвода тепла от передней части цапфы ТВД в систему воздушного охлаждения. Такой переходный режим для двухвального двухконтурного двигателя может возникнуть, например, на запуске теплого двигателя, который сопровождается резким нарастанием подачи холодного

масла при непрерывном прогреве диска в сочетании с низкой эффективностью воздушного охлаждения передней части цапфы ТВД или в моменты резкого замедления течений воздуха в предмасляной полости МРП.

Интенсивность и длительность процессов, вызывающих рост градиента температуры в материале корпуса подшипника, зависит от множества режимных и настроечных параметров двигателя, поэтому их вредное воздействие на МРП является индивидуальным для каждого из двигателей.

Физическая модель быстрого разрушения МРП

Сжатие наружной обоймы МРП столь велико, и это действие столь продолжительно, что микротрещины срастаются, и начинается отслаивание по-

верхностного слоя с беговой дорожки и роликов. Крупные частицы отслоившегося материала не способствуют увеличению скорости износа деталей, а, попадая между роликами и беговой дорожкой, ускоряют и усиливают повреждения поверхностного слоя.

Если наружная обойма МРП не проворачивается в носке ТВД, то дефект локализуется в секторе, противоположном направлению вектора дисбаланса в плоскости ТВД. Процесс развивается лавинообразно и сопровождается быстрым ростом вибраций из-за роста некруглости беговой дорожки наружной обоймы МРП.

По мере увеличения амплитуды вибраций начинаются касания деталей лабиринтных уплотнений роторов друг о друга, что приводит к резкому уменьшению радиальной нагрузки на МРП с развитием проскальзывания роликов. Подшипник интенсивно разогревается вплоть до размягчения материалов его деталей.

Внешним проявлением такого направления развития ситуации является очень быстрый рост вибраций.

Физическая модель процесса «залечивания» МРП

Процесс «залечивания» МРП начинается с ослабления сжатия наружной обоймы МРП и возвращения её в исходное состояние, вследствие уменьшения тепловых градиентов в цапфе турбины и/или по мере развития износа деталей, который уменьшает радиальный натяг в подшипнике и толщину растресканного слоя. Развитие дефекта прекращается, а успевшие возникнуть небольшие раковины заполняются продуктами износа и закатываются. В зависимости от интенсивности и продолжительности сжатия наружной обоймы процесс повреждения МРП может прекратиться на разных стадиях и иметь следующие проявления:

— слабое помутнение поверхности беговой дорожки наружной обоймы и роликов в зоне их кон-

такта с размытыми краями (обычно допускается к дальнейшей эксплуатации);

— увеличение радиального люфта МРП с повышением амплитуды скачков вибрации при переходе с режима колебаний к режиму круговой обкатки;

— повышение шума МРП из-за износа сепаратора;

— повышение (с последующей стабилизацией) общего уровня вибраций из-за увеличения некруглости беговой дорожки наружной обоймы.

Выводы

1. Причиной быстрого разрушения межроторного подшипника опоры турбины высокого давления является действие повышенных контактных нагрузок, возникающих вследствие выборки радиального зазора подшипника и неравномерного трещинового сжатия обоймы подшипника.

2. Интенсивность и длительность процессов, вызывающих градиент температуры корпуса подшипника, зависит от множества режимных и настроечных параметров двигателя, поэтому их вредное воздействие на МРП является индивидуальным для каждого из двигателей.

3. Эффективные меры по исключению дефекта МРП должны быть направлены на обеспечение стабильности геометрии его посадочных мест в широком диапазоне изменения режимных факторов.

Библиографический список

1. *Равикович Ю.А., Киянский Т.Н., Кабанов Н.А., Амелькин А.С.* Влияние температурных и силовых воздействий на подшипниковый узел // Вестник МАИ. 2009. №3.

2. *Леликов О.П.* Валы и опоры с подшипниками качения. Конструирование и расчет: Справочник. — М.: Машиностроение, 2006.

3. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 20.11.2009