
УДК 629.7.03.018

Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения

Зубко А.И.^{*}, Донцов С.Н.^{}**

Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки – филиал ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО),

ОКБ им. А. Люльки, ул. Касаткина, 13, Москва, 129301, Россия

**e-mail: zbk2@yandex.ru*

***e-mail: sergenij@mail.ru*

Аннотация

Рассматриваются вопросы использования наноструктурированных высокопрочных композиционных керамических материалов, в качестве конструкционных, при создании и производстве деталей опор газотурбинных двигателей. Оцениваются преимущества и недостатки таких конструкций в сравнении с традиционными подшипниками качения и способы их диагностики. Приводятся результаты, полученные при выполнении экспериментальных работ. Сделан положительный вывод в пользу применения керамических материалов для изготовления деталей подшипниковых узлов опор роторов.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, подшипники качения, вибродиагностика.

Цель: исследование с использованием средств вибродиагностики возможности применения наноструктурированных высокопрочных композитных керамических

материалов в качестве конструкционных для подшипников скольжения опор роторов авиационных газотурбинных двигателей.

1. Состояние рассматриваемого вопроса на сегодняшний день.

Необходимость улучшения тактико-технических характеристик летательных аппаратов требует от разработчиков силовых установок достижения все более высоких значений газодинамических параметров рабочего цикла двигателя. Это возможно за счет уменьшения аэродинамического сопротивления элементов газовоздушного тракта, путем уменьшения количества рабочих ступеней лопаточных машин и более совершенным профилированием их элементов, а так же увеличением рабочих частот вращения роторов и т.д..

Но при более высоких оборотах роторов резко увеличиваются нагрузки на все детали двигателя, особенно роторных систем. Они 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.

Проблемы надежности подшипников опор роторов механических устройств существовали с момента их создания, и будут существовать, пока они используются. Причины этого лежат в сложности самой конструкции и технологии ее изготовления, а также высоких нагрузках испытываемых деталями подшипников.

Не являются исключением и газотурбинные двигатели (ГТД), где в узлах опор роторов используются высоконагруженные подшипники качения.

Количество двигателей, на которых в процессе эксплуатации произошли повреждения подшипников качения, составляет всего несколько процентов от их общего числа. Однако, последствия их отказа для ГТД и всего летательного аппарата в целом могут быть столь существенны, что это выводит данный отказ на одно из первых мест в перечне наиболее опасных неисправностей.

Уже сегодня, на серийно выпускаемых двигателях, долговечность подшипников подходит к своему верхнему пределу, что не позволяет использовать существующие конструкции подшипниковых опор роторов в перспективных двигателях. Дальнейшее увеличение частоты вращения и нагрузок на подшипник при отработке схем опор для перспективных конструкций и проведении испытаний иногда приводит к результатам изображенным на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1. Беговая дорожка наружного кольца роликового подшипника



Рисунок 2. Наружная поверхность тела качения (ролика)

Из этой ситуации можно выйти несколькими способами – увеличением 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 и значительного увеличения их работоспособности пока не отмечено. Виной этому многие проблемы, начиная с качества материалов для изготовления деталей подшипников качения и заканчивая технологическими возможностями производства не позволяющими достичь требуемых результатов.

2. Характеристики материалов для изготовления подшипников.

В последние годы появились новые материалы представляющие из себя полученную спеканием при высоких температурах и давлениях смесь из порошкообразных керамических или металлических связующих материалов и присадок в различных соотношениях, в виде карбидов, нитридов, лигирующих

металлов. Размеры отдельных частиц имеют наноструктуру, чем достигается получение однородных свойств образцов из которых изготавливаются детали машин и механизмов.

Варьирование составами отдельных элементов, которые входят в керамическую композицию и их пропорциями позволяет получить новый комплекс свойств реализованных в одном материале. Наряду с высокой твердостью новые материалы обладают приемлемой вязкостью, что позволяет повысить устойчивость к циклическим нагрузкам и трещиностойкость. В дополнение к вышеуказанным свойствам появляются и новые – аномально низкий коэффициент трения (близкий к коэффициенту трения фторопласта), высокая теплопроводность, высокие рабочие температуры и коэффициент термического расширения при нагревании близкий к применяемым в настоящее время конструкциях ГТД сталям.

Полученный комплекс свойств керамических материалов нового поколения открывает широкие просторы для их использования в большом количестве узлов и агрегатов перспективных ГТД. Это могут быть лопатки и диски компрессора и турбины, валы роторов, в том числе и с использованием интегрированных в конструкцию подшипников. Технология изготовления керамических деталей позволяет получать в одной неразъемной детали зоны с совершенно различными свойствами, заранее заданными для каждого неразъемного узла. Ранее такие детали изготавливались как самостоятельные элементы сборочных единиц, и требовали дополнительного крепежа для сборки. Понятно, что такая конструкция состоит из

большого количества деталей их совместных сопряжений, а в итоге - увеличивается общий вес конструкции.

Напротив, при объединении в единое целое нескольких деталей получается существенный выигрыш во всех направлениях. Так, например, подшипник опоры ротора может быть интегрирован в диск рабочего колеса турбины или компрессора и выполнен как единое целое с ним. В свою очередь, применение интегрированных подшипников, позволяет повысить их несущую способность, уменьшить геометрические размеры, что ведет к снижению скоростей взаимодействующих деталей и соответственно повышает надежность и долговечность узла.

4. Особенности конструкции экспериментального подшипника.

Для оценки возможности реализации в конструкции опор роторов ГТД подшипников из керамических материалов нового поколения были разработаны и испытаны варианты гладких гидродинамических керамических подшипников скольжения. Их геометрические характеристики были выбраны таким образом, чтобы обеспечивалась возможность их применение взамен роликового подшипника качения, применяемого в одном из серийных двигателей. Принципиальная схема такого подшипника изображена на рисунке 3, а фотографии наружного и внутреннего колец на рисунках 4,5.

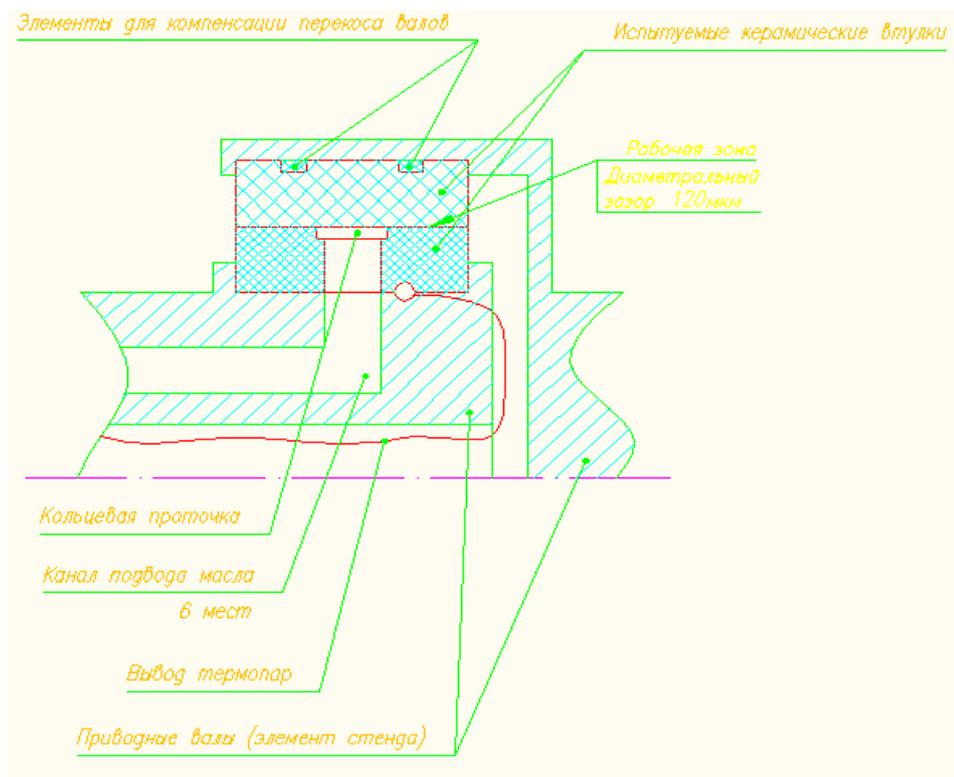


Рисунок 3. Принципиальная схема экспериментального гладкого керамического подшипника скольжения

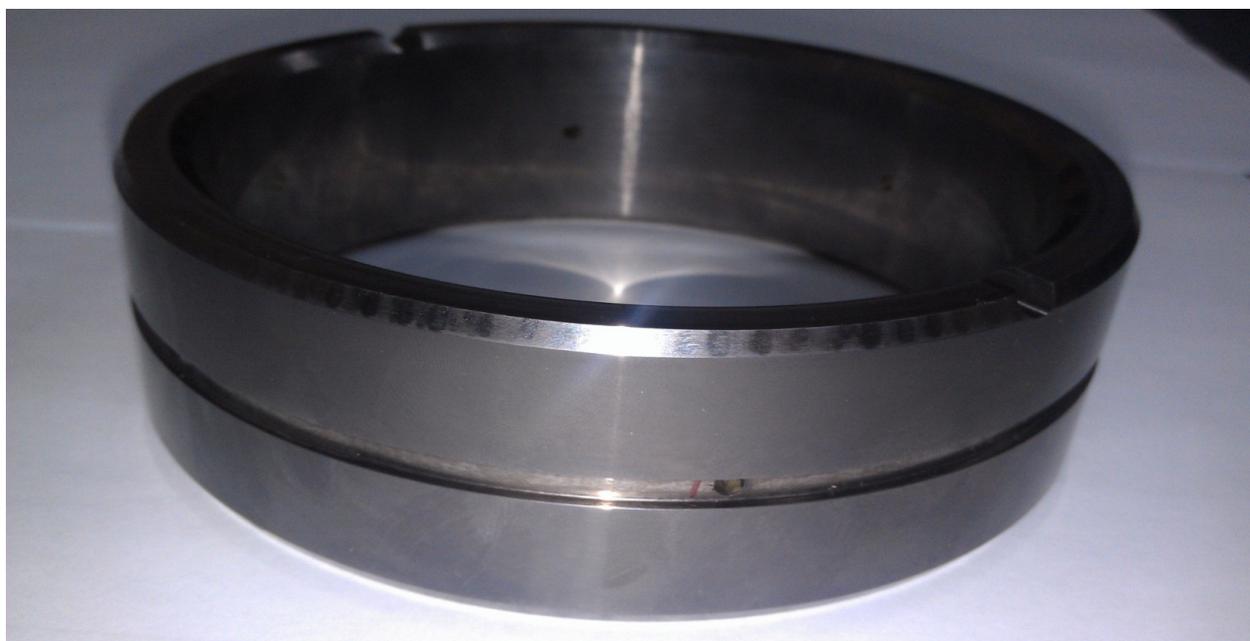


Рисунок 4. Внутреннее кольцо подшипника



Рисунок 5. Наружное кольцо подшипника

Исследования проводились на испытательном стенде ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», где для получения и анализа параметров работы подшипника скольжения были дополнительно установлены датчики температур на внутренней поверхности его внутренней втулки и масла на входе и выходе в экспериментальный узел (смотри рисунок 3). В процессе проведения испытаний проводился мониторинг вибросостояния стенда.

Общий вид собранного экспериментального стенда показан на рисунке 6.

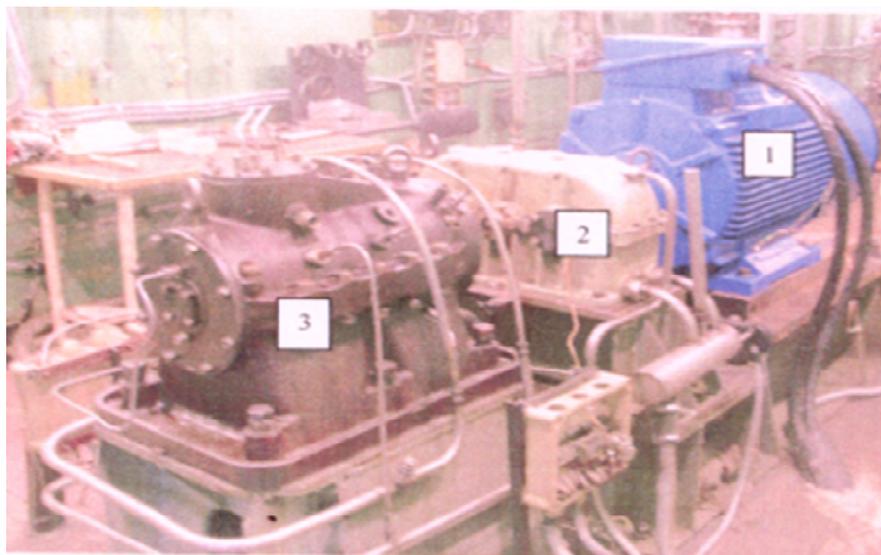


Рисунок 6. Общий вид стенда испытаний подшипников

5. Диагностическое сопровождение при проведении испытаний состояния деталей экспериментального подшипника

При проведении испытаний проводился постоянный мониторинг исследуемого подшипника. Для оценки влияния изменяющихся, согласно программы испытаний, внешних факторов (величина радиальной нагрузки, количества подводимого к подшипнику масла, изменения вибронагруженности, дисбаланса роторов стенда и т.д.) используется комплексный подход к диагностике состояния деталей испытуемого подшипника. Он включает в себя анализ спектрального состава масла проходящего через подшипниковый узел, оценку температурного состояния деталей подшипника и смазывающего его масла, анализ вибрации экспериментального узла стенда испытаний подшипников.

С помощью оценки тренда температур деталей подшипника (смотри рисунок 7) и степени подогрева проходящего через взаимодействующие детали подшипника масла вычислены приближенное значение коэффициента трения в рабочей паре подшипника скольжения и величина потерь на тепловыделение при его работе.

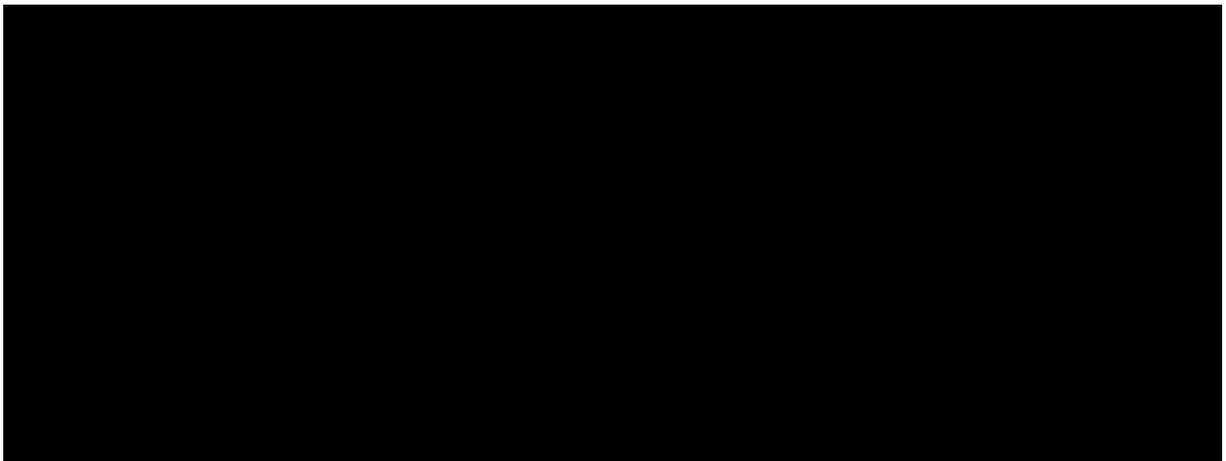


Рисунок 7. Изменение температуры подшипника в зависимости от приложенных радиальных нагрузок при постоянной частоте вращения

5900 об/мин

Подтверждено утверждение о том, что подшипники скольжения, работающие в условиях жидкостного трения, когда слой масла отделяет рабочие поверхности цапфы и вкладыша друг от друга и исключает непосредственную возможность их контакта, тогда потери на трение в этом случае будут весьма малы и не превосходят потерь на трение в подшипниках качения [1., стр.7]

Однако, данная диагностическая информация позволяет получить довольно ограниченную оценку состояния подшипника и обладает некоторой инерцией,

вызванной запаздыванием в измерениях показаний, вызванной спецификой работы датчиков температуры и временем необходимым для прогрева или охлаждения массивного стенда испытаний подшипников.

В свою очередь, спектральный анализ состава примесей находящихся в масле позволяет выявить начальные стадии износа взаимодействующих при работе деталей и на основе тренда их изменения прогнозировать работоспособное состояние узла. Однако, ввиду не возможности распознавания приборами типа «Призма», «Спектройл» и «Спектроскан» керамических продуктов износа находящихся в масле, данный метод диагностики для керамических подшипников оказался не информативным (Смотри рисунок 8 и таблицу1).

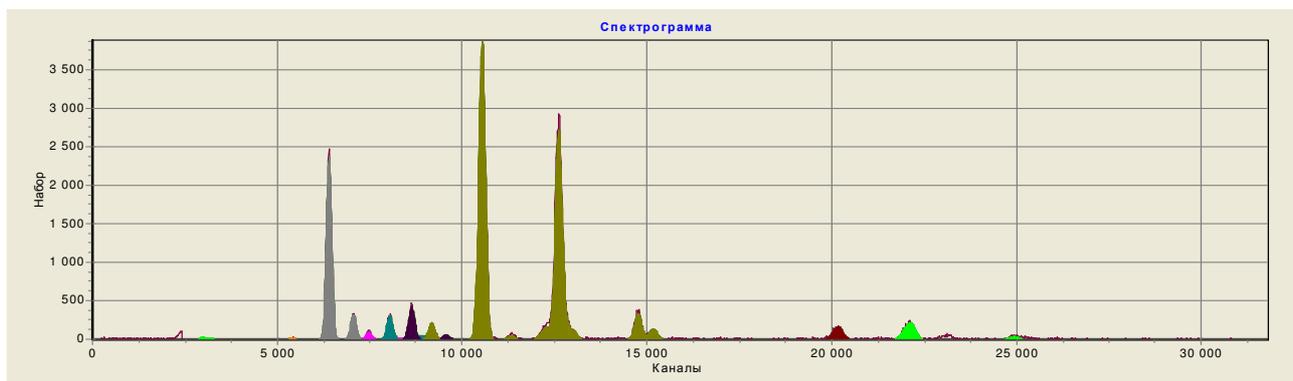


Рисунок 8 Спектрограмма содержания химических элементов в пробе масла

Таблица 1

Содержание химических элементов в масле (в граммах на тонну)

Элемент	Набор	Концентрация	Элемент	Набор	Концентрация	Элемент	Набор	Концентрация
Cr- хром	210.7	0.42	Fe- железо	31258.1	36.88	Ni- никель	1273.2	0.95
Cu- медь	4208.8	2.69	Zn- цинк	6050.2	3.19	Rh- родий	3282.7	3.53
Ag- серебро	6172.0	8.10	Pb- свинец	111867.4	47.76			

Для диагностирования подшипников в режиме реального времени больше всего подходит метод распознавания технического состояния узла по его вибрации.

Использование, для оценки состояния роторной системы испытательного стенда подшипников, таких видов анализа вибрации как спектральный и орбитальный, позволяет в режиме реального времени, определить возможные технические состояния экспериментального узла, и их изменения влияющие на его работоспособность. С помощью данных методов легко определяются возникающие колебания роторов, перекосы и изломы осей роторов, прямые и обратные прецессии, задевания деталей ротора и статора, дисбалансы роторов, наличие в диапазоне рабочих режимов резонансов роторов и отдельных конструктивных элементов стенда.

Вышеперечисленный набор критериев оценки состояния исследуемого подшипника позволяет выполнить анализ непосредственно при проведении исследований характеристик рабочих процессов и их отклонения от заданных программой испытаний условий. Это дает возможность своевременно, в ходе эксперимента, корректировать изменение внешних факторов для получения более качественных и более достоверных результатов испытаний.

В случаях, когда в процессе работы стенда изменить его характеристики невозможно, применение вибродиагностического сопровождения испытаний позволяет корректировать или правильно оценивать получаемые результаты с учетом дополнительного воздействия нерасчетных внешних факторов.

Так, например, подшипники скольжения очень чувствительны к несоосности (перекосу) рабочих поверхностей. Такие перекосы возникают из-за неточности изготовления и монтажа отдельных деталей подшипника и испытательного стенда. При проектировании экспериментальных подшипников были выполнены конструктивные мероприятия, позволяющие частично компенсировать несоосности и корректировать их в процессе испытаний.

Дефектация деталей экспериментального керамического подшипника скольжения после разборки стенда подтвердила правильность выводов полученных при проведении вибродиагностики в процессе испытаний.

Следовательно, применение в режиме реального времени, диагностики состояния деталей экспериментального подшипника позволило сократить количество переборки стенда для визуальной и инструментальной оценки контактирующих рабочих поверхностей испытуемых элементов, что дало возможность сократить общее время проведения испытаний. Точное определение состояния экспериментального подшипника во время его работы позволяет выбрать оптимальные режимы и величины прикладываемых нагрузок и более качественно провести испытания.

В результате наличия дефектов изготовления или сборки роторов, а так же при некоторых условиях работы возникают их колебания и прецессионные движения. Анализ характера этих колебаний, при помощи построения орбиты перемещения вала, может свидетельствовать о динамических процессах, происходящих в роторных системах и приводящих к досрочному выводу из строя подшипниковых опор.

В качестве примера на рисунках 9-11 приведены несколько орбит движения роторов при различных внешних условиях их работы.

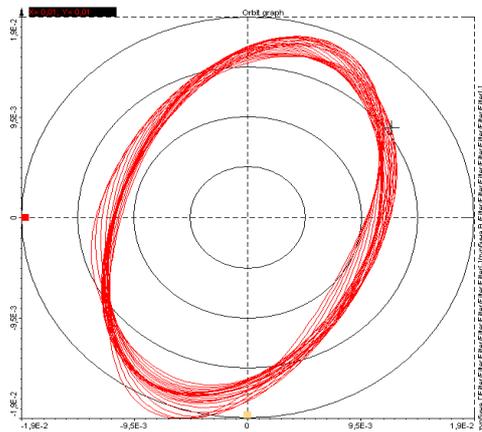


Рисунок 9. Орбита вала ротора в нормальном состоянии

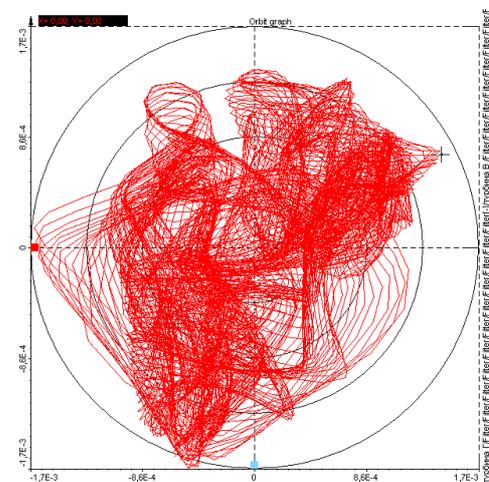


Рисунок 10. Сложное вибрационное состояние подшипникового узла.

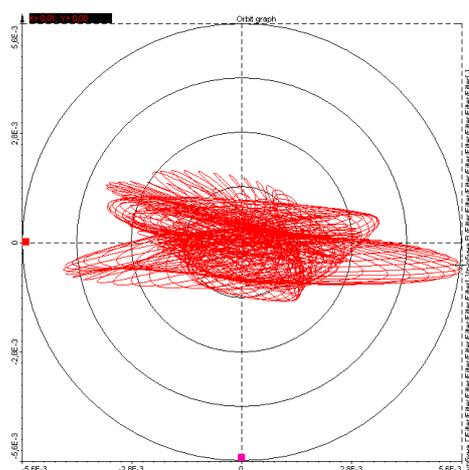


Рисунок 11. Прецессия вала

Комплексное использование орбитального и спектрального видов анализов вибрации расширяет базу данных получаемой информации и позволяет более точно диагностировать техническое состояние испытываемых объектов.

Один из примеров спектра вибрации при сложном характере колебательных процессов ротора, был получен с использованием быстрого преобразования Фурье, приведен ниже на рисунке 12.

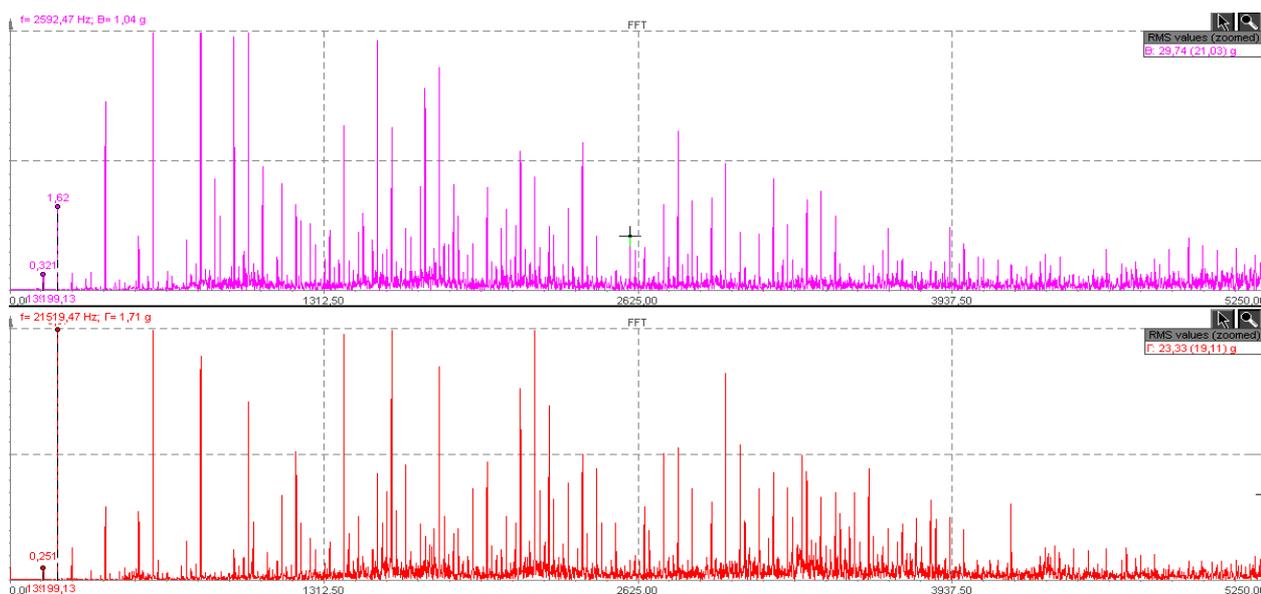


Рисунок 12. Спектр вибрации стенда перед отказом экспериментального подшипника

Величина вибрации, при проведении испытаний экспериментального подшипникового узла, определялась в первую очередь амплитудой гармоник роторных частот. Так, например, максимальное значение имела 5 гармоника ротора ВД (частота 1000 Гц) и она в 3,5 раза превышала амплитуду роторной частоты (частота 199Гц). Число гармоник ротора ВД достигало более 10, что свидетельствует о развитом характере колебательного процесса. При анализе спектра вибрации не прослеживалось суб и супергармоник роторных частот (в том числе и «сепараторной» частоты).

Диагностические признаки нескольких различных событий характеризующих изменения или отклонения в работе экспериментального подшипника могут совпадать. Для идентификации конкретного проявления технического состояния

подшипника необходимо совместно провести несколько видов анализа вибрации (смотри рисунки 13 -16) и при совпадении их результатов вероятность правильного распознавания диагностического события значительно повышается. В противном случае выявятся индивидуальные особенности не характерные для данного события, что позволит определить его как не относящееся к данному состоянию.

При проведении постобработки записанной в процессе испытаний информации, использовались виды анализа, имеющие большую информативность и детализацию событий, но требующие значительных затрат времени. Например, построение каскадного 3Д спектра вибрации во всем диапазоне испытаний, позволяет выделить для дальнейшей их более детальной оценки наиболее критические режимы исследований.

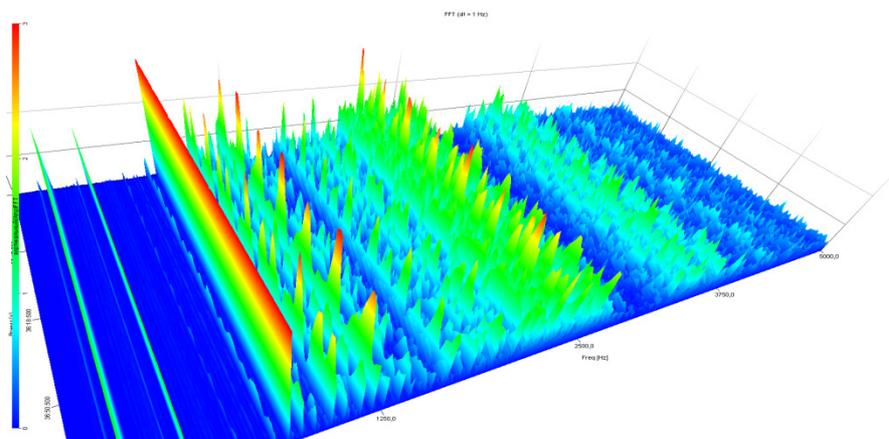


Рисунок 13 3Д спектр вибрации подшипникового узла

Анализ огибающей спектра вибрации – позволяет по наличию в высокочастотном спектре модулирующих, заранее определенных собственных

частот ротора, опор и стэнда определить наличие граничного или сухого трения в рабочей паре подшипника скольжения. (Смотри рисунок 14)

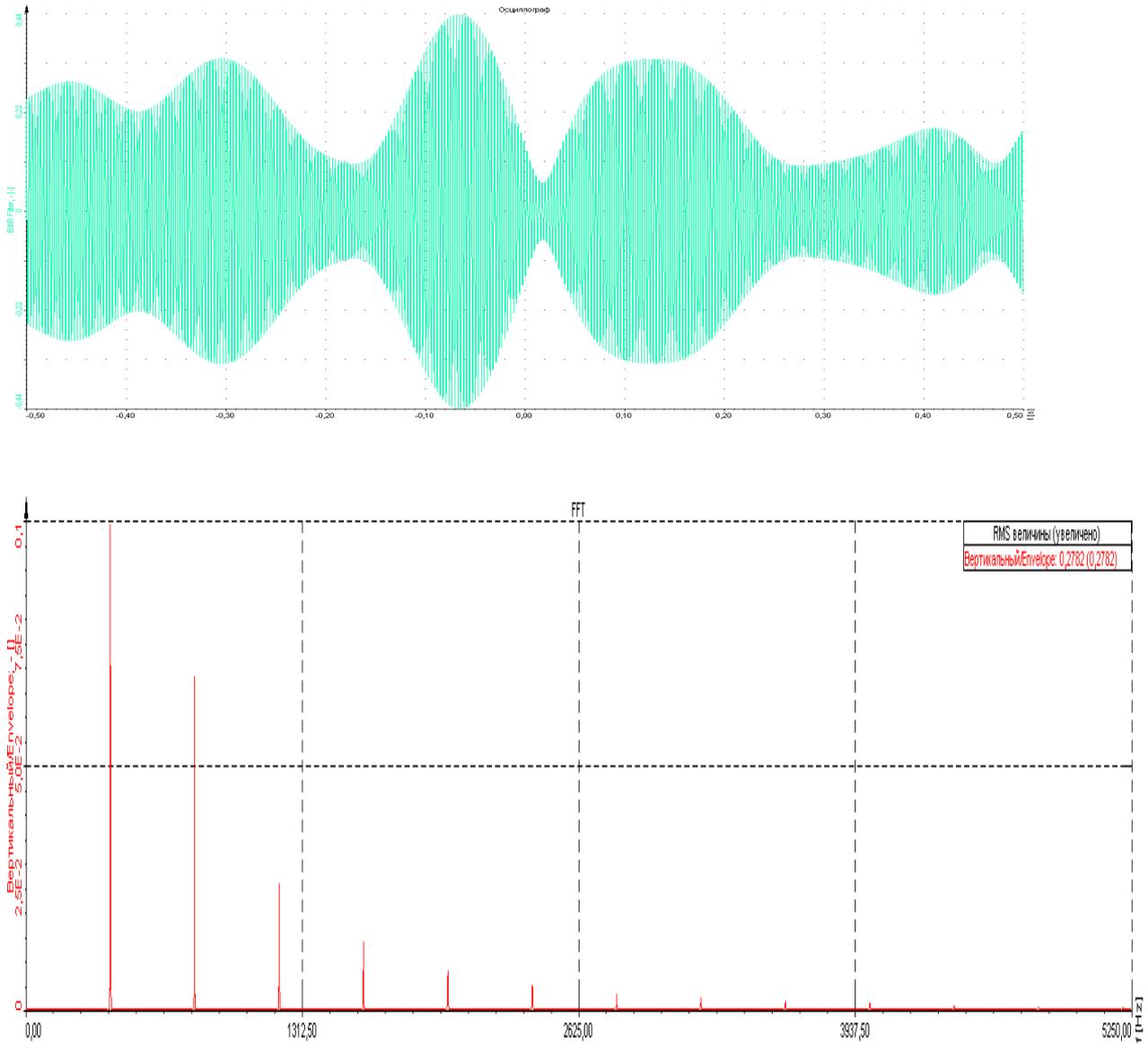


Рисунок 14 Огибающая спектра вибрации

1/3 октавный анализ позволяет определить изменения в процессе испытаний в перераспределении амплитуд в различных частотных диапазонах вибрации.

Рост амплитуды вибрации в отдельных сегментах исследуемого диапазона частот от 0 до 21кГц - является диагностическим признаком изменения качества работы исследуемого подшипника.

Так, например, увеличение сегмента в высокочастотной области вибрации может свидетельствовать о появлении граничного трения между взаимодействующими во время работы поверхностями подшипника скольжения, появляющегося в результате уменьшения толщины масляного слоя и задеваний вершин шероховатостей.

(Смотри рисунок 15)

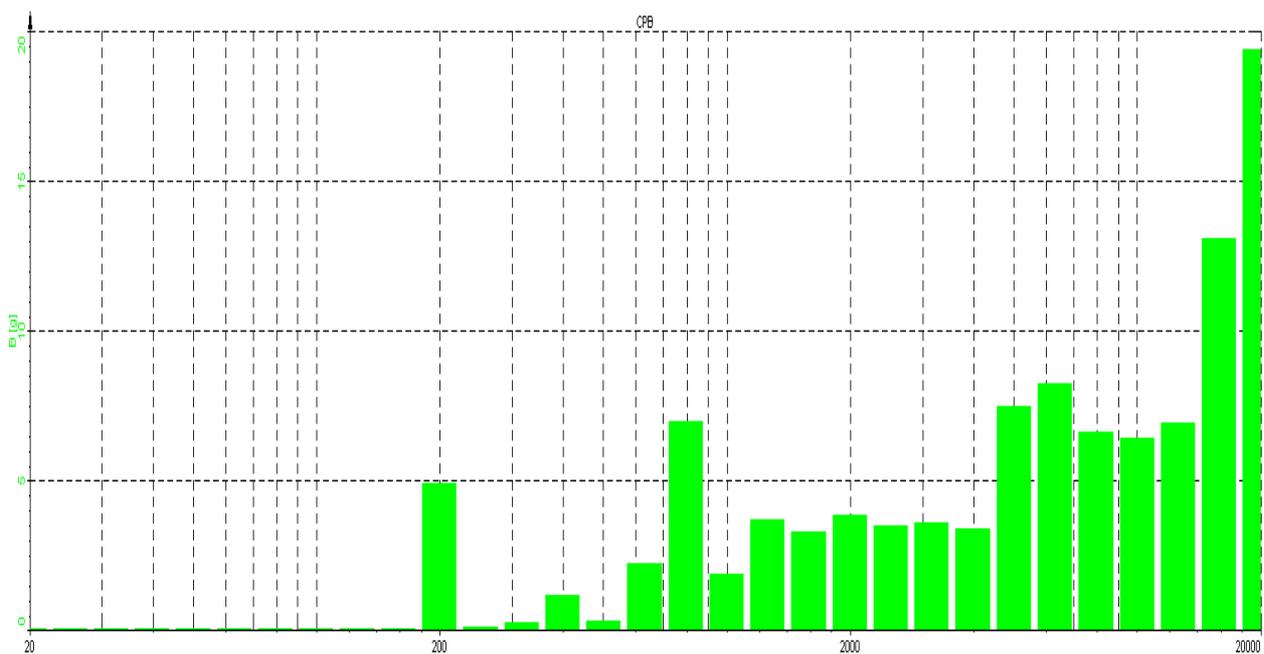


Рисунок15 1/3 октавный анализ

Анализ параметров «сырого» сигнала вибрации несет в себе дополнительную информацию и обладает высокой информативностью.

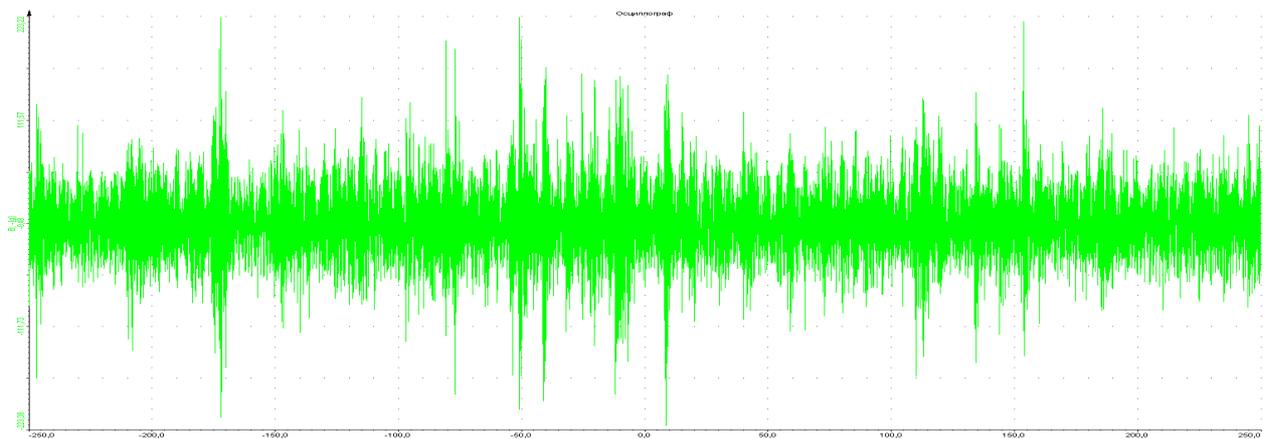


Рисунок16 амплитудно – временная зависимость «сырого» сигнала вибрации

В результате программной обработки и построения тренда изменения пик-фактора и СКЗ вибрации, а затем сравнения со значениями данных параметров полученными при испытаниях подшипника доведенного до разрушения (СКЗ – зеленый цвет, пик-фактор – фиолетовый цвет на рис.17) диагностируется техническое состояние экспериментального подшипника и прогнозируется его работоспособность. (Смотри рисунок 17)

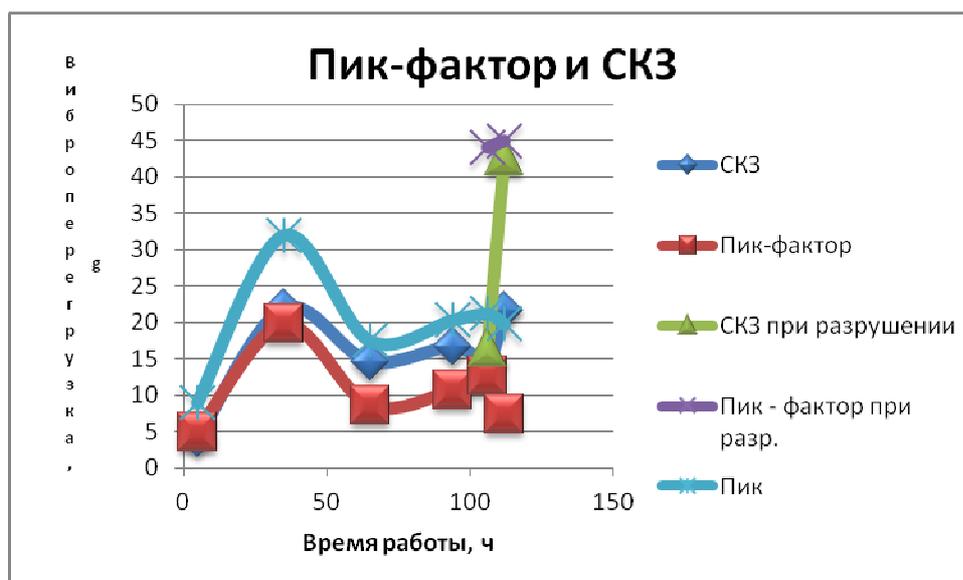


Рисунок 17 Тренд изменения пик-фактора и СКЗ исследуемого подшипника

На основании комплексной оценки полученной диагностической информации и имеющихся данных характеризующих параметры, историю проведения исследований и т.д., специалистом в области вибродиагностики принимается решение о техническом состоянии экспериментального подшипника, необходимости внесения корректив в программу испытаний, а также составляется прогноз его работоспособности.

6. Порядок выполнения экспериментов.

Программой испытаний предусматривалась имитация условий работы межроторного подшипника авиационных газотурбинных двигателей.

Испытательный стенд подшипников имеет два отдельных привода на каждый из валов имитирующих ротор высокого и ротор низкого давления двигателя. Использование отдельных приводов позволяет создавать разное соотношение частот вращения роторов соответствующее условиям работы в реальном ГТД. По условиям испытаний, были дискретно воспроизведены режимы работы во всем рабочем диапазоне частот вращения роторов ГТД от малого газа до максимального режима.

На каждом из режимов, путем приложения радиальной нагрузки к деталям стенда передающим внешнюю силу на наружное кольцо экспериментального подшипника, имитировалось воздействие усилий передающихся от роторов на опоры двигателя, при воздействии в полете перегрузок до 5 единиц.

На всех режимах исследовалась работоспособность керамического подшипника при пониженных расходах масла в диапазоне от 0,3 литров в минуту до 0.

7. Результаты экспериментов и выводы

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).

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. В сравнении с реализованным на сегодняшний день расходом масла в подшипниках качения опор турбины изделия типа «99» он уменьшился более чем в 10 раз.

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

Средствами вибродиагностики была подтверждена работоспособность керамического подшипника скольжения нового поколения.

За счет использования диагностического сопровождения проведения исследований подшипников, в том числе и в режиме реального времени, было сокращено количество остановок и переборок стенда для визуально-инструментальной оценки состояния исследуемого узла, что позволило уменьшить общую стоимость работ и время проведения экспериментов.

В процессе дефектации экспериментального подшипника после окончания процесса испытаний, была подтверждена правильность оценки состояния рабочих деталей подшипника выполненная средствами вибродиагностики и выбранных подходов к построению алгоритмов проведения комплексной диагностической оценки.

Результаты, полученные при проведении исследований керамических подшипников нового поколения, позволили приступить к их дальнейшим усовершенствованиям.

Литература:

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

The Analysis of the Operability Conditions and Diagnostic Development for the New Generation Ceramic Bearings.

Authors: ZUBKO Aleks I. 1* DONCOV Serg N. 2**

1. Design engineer, design im.A.Lyulki of NPO «UMPO», 129301 Moscow, Kasatkina str. 13; the applicant of the Moscow Aviation Institute (National Research University).

*Phone: (963)-927-00-64; e-mail: Zbk2@yandex.ru

2. Design engineer, design im.A.Lyulki of NPO «UMPO», 129301 Moscow, Kasatkina str. 13.

**Phone: (903) 232-59-48; e-mail: sergenij@mail.ru.

Abstract:

Objective

The analysis of the nano-structured high strength materials for sliding bearings of the rotor support in aero – gas turbine engines by the vibro-diagnostic methods.

Methodology

To estimate the opportunity of implementating rotor support ceramic bearings in gas turbine engines, different versions of smooth hydrodynamic ceramic sliding bearings with similar to the roll bearings geometry in the series production were developed and tested.

The impact of the friction couple materials on the bearing operability was analyzed.

During testing the complex approach to the diagnostic estimation of the tested bearing conditions was optimized. The work was fulfilled in real time scale and include analysis of the spectral bearing oil, evaluation of the thermal component conditions of bearing parts and its oil, vibration analysis of the experimental part on the test rig.

The Results

The efficient design of the smooth hydrodynamic ceramic sliding bearing for the rotor support in gas turbine engine was developed.

The complex method of evaluating technical conditions of the ceramic sliding bearing was designed what allows the timely estimation of the experimental part conditions during testing and instantly change the designed outer loading.

The sliding ceramic bearing design of a new generation confirmed its operability with lower oil consumption to 0,1 l/min.

The best operability factors were achieved with new generation ceramic couple used (composite on the basis of silicon carbide with the composite on the basis of titanium carbo-nitrid).

The area of implementation

The achieved results allow to start testing ceramic sliding bearings in the gas turbine engines. The defined features of the working processes would be used for further improvement of the bearing support design.

The achieved results may be implemented in the diagnostic system and used by the gas turbine operators for making decisions on the compatibility of the tested bearing with the specification.

Conclusions

The advantages and shortcomings of the new generation ceramic bearings and means of diagnostics versus conventional roll bearings were analyzed.

The implementation of the nano-structured high strength ceramic composite materials for design and manufacture of the gas turbine engine bearing supports is acknowledged superior in comparison with the existing ones.

The implementation of the diagnostic accompaniment of the bearing analysis including real time scale decreased the number of stops and test rig partitioning for visual and instrumental estimate of the tested part, thus reduced the total cost of work and duration of the experiment.

Keywords:

Gas turbine engines, bearings, vibrodiagnostics.

References:

1. Chernavsky S.A. Sliding bearings. Moscow, Mashgiz, 1963, 245 p.

Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения

Цель

Исследование с использованием средств вибродиагностики возможности применения наноструктурированных высокопрочных композитных керамических материалов в качестве конструкционных для подшипников скольжения опор роторов авиационных газотурбинных двигателей.

Методика

Для оценки возможности реализации в конструкции опор роторов ГТД подшипников из керамических материалов нового поколения были разработаны и испытаны варианты гладких гидродинамических керамических подшипников скольжения, с геометрическими характеристиками соответствующими подшипнику качения одного из серийных двигателей.

Проанализировано влияние на работоспособность подшипника скольжения характеристик материалов рабочей пары деталей.

При проведении испытаний отработывался комплексный подход к диагностической поддержке оценки состояния деталей испытуемого подшипника.

Работы выполняются в режиме реального времени, и включают в себя анализ спектрального состава масла проходящего через подшипниковый узел, оценку температурного состояния деталей подшипника и смазывающего его масла, анализ вибрации экспериментального узла стенда испытаний подшипников.

Результаты:

Создана работоспособная конструкция гладкого гидродинамического керамического подшипника скольжения для использования в составе опор ротора газотурбинного двигателя.

Разработана комплексная методика оценки технического состояния керамического подшипника скольжения, которая позволяет своевременно, в ходе эксперимента, оценивать состояние экспериментального узла и оперативно корректировать уровни задаваемых внешних нагрузок.

Конструкция подшипника скольжения из керамических материалов нового поколения подтвердила работоспособность при уменьшенных расходах масла до 0,1 литра в минуту.

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).

Область применения результатов:

Полученные результаты позволяют приступить к испытаниям керамических подшипников скольжения в составе конструкции ГТД. Выявленные особенности их рабочих процессов будут использованы при дальнейшем совершенствовании конструкций деталей подшипниковых опор.

Полученные диагностические признаки могут быть внедрены в системы диагностики и использованы при принятии решения эксплуатирующим ГТД персоналом о соответствии параметров исследуемого подшипника заданным техническим условиям.

Выводы:

Проанализированы преимущества и недостатки конструкций керамических подшипников нового поколения в сравнении с традиционными подшипниками качения и способы их диагностики. Сделан положительный вывод в пользу использования наноструктурированных высокопрочных композиционных керамических материалов, в качестве конструкционных, при создании и производстве подшипников опор газотурбинных двигателей.

За счет использования диагностического сопровождения проведения исследований подшипников, в том числе и в режиме реального времени, было сокращено количество остановок и переборок стенда для визуально-инструментальной оценки состояния исследуемого узла, что позволило уменьшить общую стоимость работ и время проведения экспериментов.

Литература

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