

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ПУТЁМ НАНЕСЕНИЯ НАПЫЛЯЕМЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

© 2018

**М. В. Силуянова** доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»;  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);  
[dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

**А. О. Фертиков** магистрант;  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);  
[alexferтиков@gmail.com](mailto:alexferтиков@gmail.com)

За счёт модификации рабочей поверхности изделий путём нанесения на неё защитных и функциональных покрытий можно существенным образом изменить механические, оптические, электрические, магнитные, тепловые и химические свойства исходного конструкционного материала, его реальную поверхность, получая изделия с защитными, например, антикоррозионными, износостойкими и прочими свойствами. Исследуется возможность усовершенствования узлов трения силовых установок летательных аппаратов путём нанесения напыляемых покрытий из наноструктурированных керамических композитов. В качестве прототипа узла трения взят тяжело нагруженный подшипник в составе редуктора привода винтовентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя. Оцениваются преимущества и недостатки усовершенствованных узлов трения по отношению к серийным образцам и их прототипам, выполненным по улучшенной серийной технологии. Приводятся результаты, полученные при выполнении экспериментальных работ. Сделан положительный вывод о применении наноструктурированных композиционных материалов при разработке узлов трения и определён наиболее благоприятный способ нанесения покрытия.

*Газотурбинный двигатель; подшипник скольжения; наноструктурированный керамоматричный композит.*

---

**Цитирование:** Силуянова М.В., Фертиков А.О. Усовершенствование узлов трения силовых установок путём нанесения напыляемых покрытий из керамических композитов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 122-131.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-122-131

### Введение

В настоящее время ведущими компаниями аэрокосмической отрасли осуществляются комплексные программы по разработке и внедрению на предприятиях технологий получения изделий с использованием керамоматричных композитных материалов (КМК), позволяющих улучшать отдельные характеристики выпускаемой продукции на 10-50%.

Современные КМК обладают высокой прочностью, трещиностойкостью и износостойкостью, способны воспринимать разрушающие нагрузки от термоударов, могут работать в агрессивных средах благодаря полному отсутствию коррозионных и эрозивных свойств.

В статье рассматривается возможность создания подшипников с использованием КМК для газотурбинных двигателей (ГТД), так как существующие серийные образцы имеют малый ресурс и сдерживают возможности применения более эффективных высокооборотных лопаточных машин из-за ограниченной возможности работы в тяжёлых условиях.

На данный момент осуществимо создание как цельного узла трения из КМК [1], так и значительное совершенствование отдельных элементов узла, выполненных в классических конструкционных материалах при помощи различных, в том числе антифрикционных, покрытий из КМК [2]. Второй путь является наиболее простым, экономически и технически достижимым по временным и ресурсным затратам.

### Постановка задачи

Для наиболее востребованных новых узкофюзеляжных ближне-среднемагистральных самолётов разрабатываются двигатели высокой степени двухконтурности (ТРДД) с редукторным приводом винтовентилятора.

Для обеспечения высокой надёжности и работоспособности редуктора в его конструкции применены тяжелонагруженные гидродинамические подшипники скольжения, которые могут нести большие нагрузки при высокой скорости скольжения. Однако их эксплуатация возможна только при потребном количестве прокачиваемого масла. Требования по надёжности и безопасности предусматривают возможность нарушения режима прокачки масла через подшипниковый узел, что обуславливает повышенные требования к свойствам его материалов и конструкции элементов. Актуальной является задача разработки подшипников с различными материалами пар трения. Наряду с улучшенным серийно освоенным бронзофторопластовым покрытием, предполагаемым к применению в данном узле, рассматриваются и покрытия из КМК.

Наиболее перспективными и подходящими для данной задачи являются композиты на основе карбида кремния, карбонитрида титана и диборида титана. Для нанесения покрытий из данных КМК подходят детонационный и ионно-вакуумный методы. В табл. 1 представлены основные параметры данных материалов.

Таблица 1. Материалы КМК для антифрикционных покрытий

Наименование показателя	Композит на основе карбида кремния	Композит на основе карбонитрида титана	Композит на основе диборида титана
Коэффициент линейного расширения ( $K_{л.р}$ ), $1/^\circ\text{C}$	$(2,4-5) \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент трения ( $K_{тр}$ )	0,01 – 0,3	0,07 – 0,20	0,05 – 0,19
Плотность, $\text{г/см}^3$	3,1	5,5 – 6,0	5 – 5,5
Модуль упругости, ГПа	350 – 400	500	480
Твёрдость, $HRc$	68	90 – 92	89 – 92
Предел прочности на изгиб, $\sigma_{изг}$ , МПа	300	1500	1000
Коэффициент теплопроводности $K_m$ ( $\text{Вт/м}^\circ\text{К}$ )	170	35	70
Рекомендуемая толщина покрытия, мкм	1,0	300	300
Коэффициент увеличения износостойкости в сравнении с закалённой сталью ( $HRc$ 60)	25	20	37
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	(–50) – (+1250)	(–50) – (+1000)	(–50) – (+1000)
Способ получения	Ионно-вакуумный	Детонационный	Детонационный

Объектом проектирования является тяжело нагруженный гидродинамический подшипник скольжения редуктора типа «звезда» с прямыми или шевронными зубчатыми передачами, которые используются в качестве опор равно расположенных по окружности промежуточных шестерён [3].

Рассматривается два варианта конструкции редуктора – с пятью и шестью промежуточными шестернями.

Все подшипники – взаимозаменяемые (стандартные типоразмеры) и отличаются только видом антифрикционных покрытий и способом их получения (табл. 1). Для повышения износостойкости цапф подшипников скольжения на их поверхности нанесено нитрид-титановое покрытие.

Испытуемые подшипники скольжения:

- с бронзофторопластовым покрытием (улучшенный серийный);
- покрытием на основе карбида кремния;
- покрытием на основе карбонитрида титана;
- покрытием на основе диборида титана.

Подшипник с бронзофторопластовым покрытием изготавливается методом напекания бронзового порошка на поверхность втулки подшипника. Данный подшипник не имеет керамического антифрикционного покрытия, разработан в качестве улучшенного прототипа серийного образца, используемого и разработанного на предприятии, выпускающем подобную продукцию для эксплуатируемых в нашей стране ТРДД.

Подшипник с покрытием на основе карбида кремния изготавливается путём нанесения на поверхность втулки подшипника покрытия на основе карбида кремния ионно-вакуумным способом.

Подшипник с покрытием на основе карбонитрида титана изготавливается путём нанесения на поверхность втулки подшипника покрытия на основе карбонитрида титана детонационным способом.

Подшипник с покрытием на основе диборида титана изготавливается путём нанесения на поверхность втулки подшипника покрытия на основе диборида титана детонационным способом.

### Оценка параметров подшипников и результаты расчётов

Оценка параметров подшипников проводилась аналитическим методом для течения смазки в зазоре подшипника с определяющими торцевыми утечками, который давал достаточно точную оценку, согласующуюся с результатами испытаний на специальном стенде для испытания подшипников. Пример рассчитанных аналитическим методом и замеренных на установке пиковых давлений в меридиональном сечении подшипника и прокачки масла через подшипник показан на рис. 1.

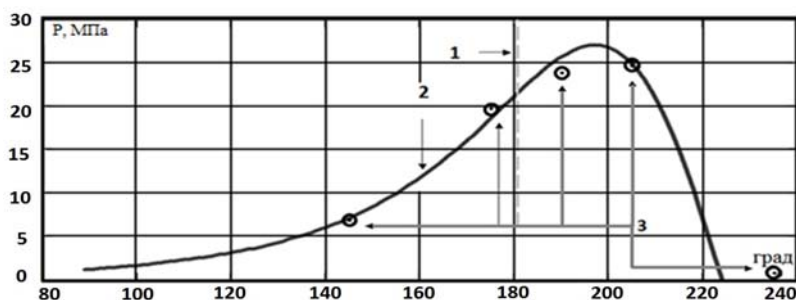


Рис. 1. Развёртка рассчитанной эпюры пиковых давлений в меридиональном сечении подшипника и замеры пиковых давлений и прокачки масла на установке:

1 – линия действия нагрузки; 2 – рассчитанная эпюра давлений; 3 – замеры давлений

**Результаты расчёта подшипников с бронзо-фторопластовым покрытием.**

В табл. 2 представлены параметры исследованного и аналоговых подшипников с бронзофторопластовым покрытием.

Таблица 2. Параметры подшипника промежуточной шестерни с бронзофторопластовым покрытием в сравнении с выполненными на предприятии

Параметр подшипника	Разработанный прототип	Подшипник для фирмы SNECMA	Серийный подшипник для редуктора
Длина ( $L$ ), мм	105	145	85
Диаметр ( $d$ ), мм	85	100	78
Радиальный зазор ( $C_m$ ), мкм	63,75	74,5	80,5
Угол подвода масла ( $al$ ), град	120	120	110
Нагрузка на подшипник ( $w$ ), кН	140,019	245,166	73,49
Частота вращения ( $n$ ), об/мин	11110	11450	13720
Скорость скольжения ( $u$ ), м/с	49,45	59,89	56,03
Температура масла на входе ( $tb_x$ ), °C	100	100	98
Уровень вязкостного подогрева масла ( $tbi_x$ ), °C	118,01	118,99	107,7
Температура начала турбулентности ( $t_{kr}$ ), °C	131,5	110,35	100,78
Средняя удельная нагрузка ( $pm$ ), МПа	15,688	16,926	11,084
Уд. мощность граничного трения ( $Nr$ ), кВт/см <sup>2</sup>	0,854	1,115	0,683
Максимальное давление в слое масла ( $P$ ), МПа	60,801	60,801	53,936
Минимальный рабочий зазор ( $h_{min}$ ), мкм	18,56	24,59	15,52
Потери вязкостного трения ( $N$ ), кВт	8,162	16,07	4,791
Потребная прокачка масла ( $q$ ), л/мин	9,87	14,26	15,7

При проектировании подшипников с бронзофторопластовым покрытием с заданной нагруженностью и оптимальными отработанными углом подвода смазки и соотношением монтажного зазора к радиусу учитывалось ограничение по максимально достигнутому (при отработке данной конструкции, технологии изготовления и эксплуатации подшипника) величинам следующих критериальных параметров подшипника:

- максимального пикового давления в смазочном слое рабочего зазора ( $P_{max} = 60,8$  кгс/см<sup>2</sup>);
- минимального рабочего зазора в подшипнике ( $h_{min} = 15$  мкм);
- коэффициента нагруженности подшипника ( $So = 29,2$ );
- режима течения смазки в подшипнике ( $Re$ );
- средней удельной нагрузки ( $pm = 16,92$  МПа);
- удельной мощности граничного трения ( $Nr = 1,115$  кВт/см<sup>2</sup>);
- длины дуги смазки.

**Результаты расчёта подшипников с покрытиями из КМК.** При испытаниях сохранялось постоянное количество смазки, прокачиваемой через подшипник (9,45 л/мин), при изменениях рабочего эксцентриситета подшипников от 0,7 (при отношении длины подшипника к его диаметру 1,25) до 0,8 (при отношении длины подшипника к его диаметру 0,8), что обусловило характерные изменения остальных параметров. На результаты гидродинамического расчёта подшипников влияние отличий характеристик предлагаемых материалов покрытий поверхностей (кроме параметров граничного тре-

ния) незначительно, а отклонения от геометрии поверхностей подшипника и степень фильтрации масла заложены в величину минимального рабочего зазора.

Зависимость длины подшипников диаметром 85 мм, обеспечивающей их расчётную несущую способность, от минимального рабочего зазора показана на рис. 2. Зависимость максимального рабочего давления в смазочном слое подшипника от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника приведена на рис. 3. Зависимость подогрева масла от вязкостного трения в подшипниках от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника показана на рис. 4. Зависимость средней удельной нагрузки на подшипник в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника приведена на рис. 5. Уровень критических и максимальных температур в масляном слое подшипника в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника (рис. 2) показан на рис. 6. Зависимость удельной мощности граничного трения в подшипнике от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника приведена на рис. 7.

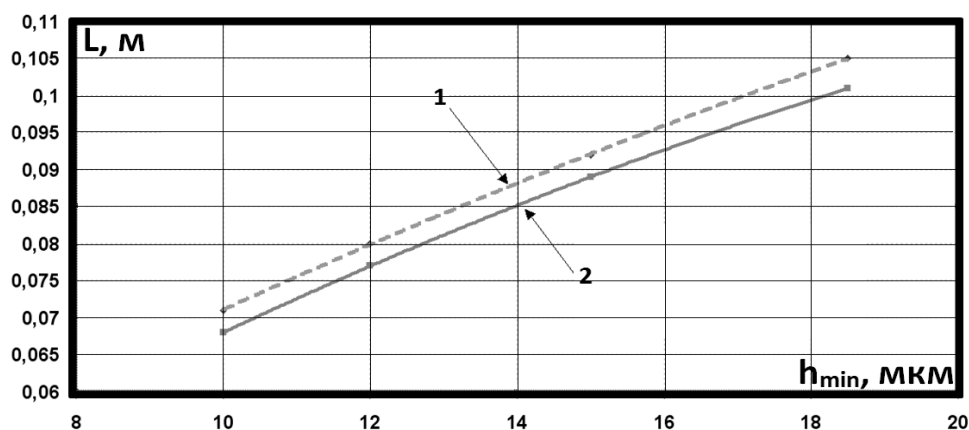


Рис. 2. Длина подшипников в зависимости от минимального рабочего зазора: 1 – для пяти промежуточных шестерён; 2 – для шести промежуточных шестерён

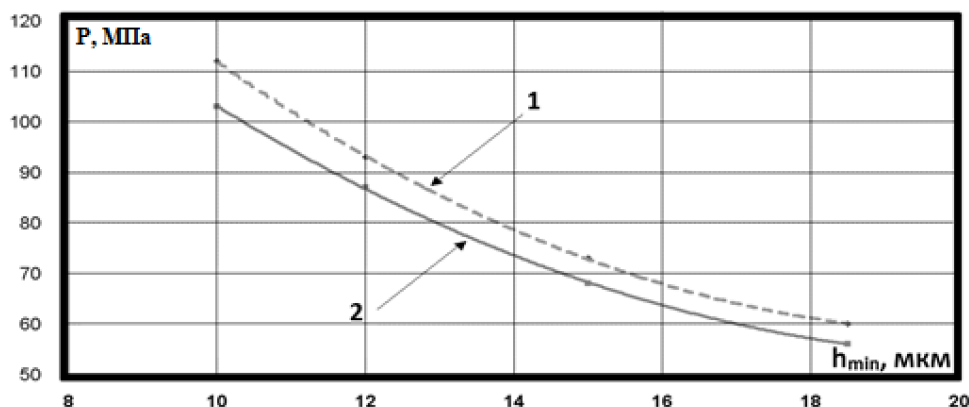


Рис. 3. Максимальное рабочее давление в слое смазки в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника: 1 – для пяти промежуточных шестерён; 2 – для шести промежуточных шестерён

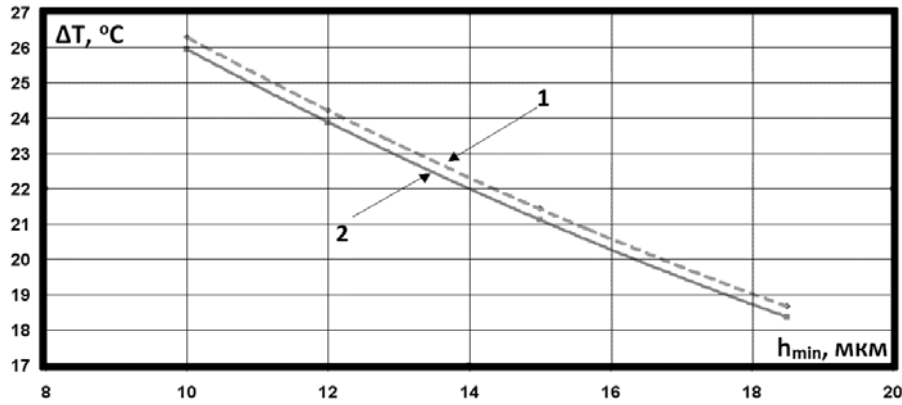


Рис. 4. Подогрев масла от вязкостного трения в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника:  
 1 – для пяти промежуточных шестерён; 2 – для шести промежуточных шестерён

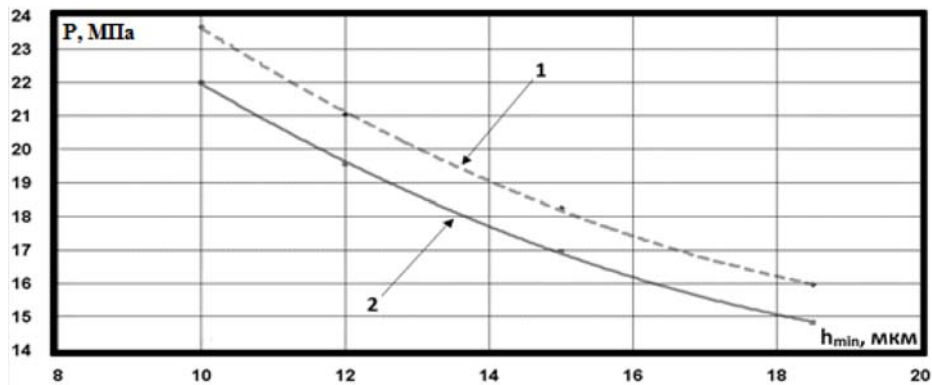


Рис. 5. Средняя удельная нагрузка на подшипник в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника:  
 1 – для пяти промежуточных шестерён; 2 – для шести промежуточных шестерён

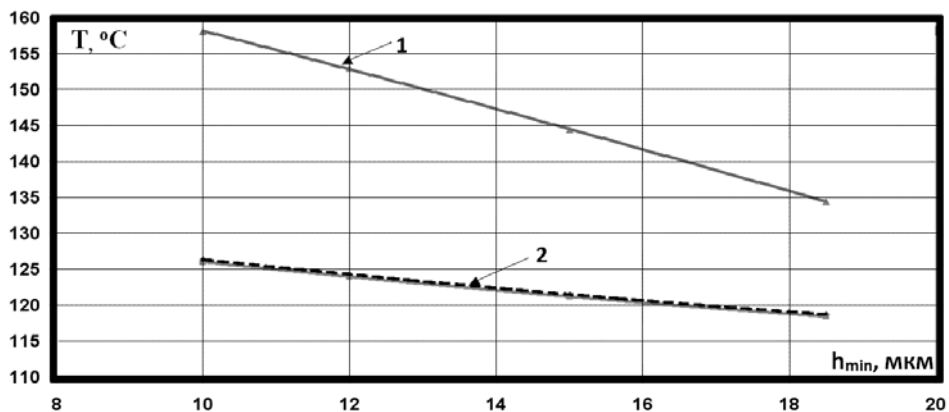


Рис. 6. Уровень критических и максимальных температур в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника для пяти и шести шестерён:  
 1 – температура возникновения начальной турбулентности;  
 2 – уровень максимальных температур от вязкостного подогрева

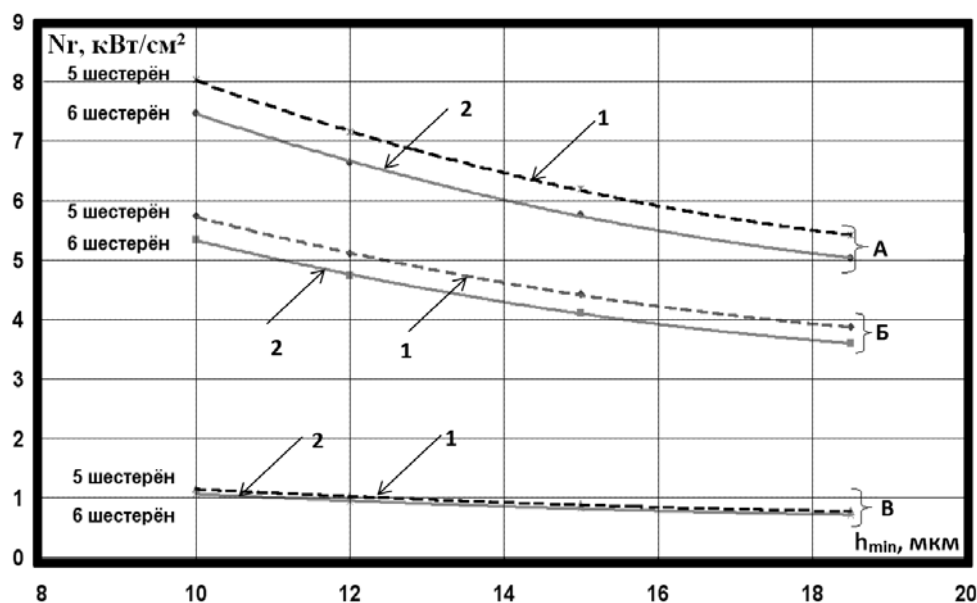


Рис. 7. Удельная мощность граничного трения в подшипнике в зависимости от минимального рабочего зазора и соответствующей ему длины подшипника:

1 – для пяти промежуточных шестерён; 2 – для шести промежуточных шестерён;  
 А – карбонитрид титана; Б – диборид титана; В – карбид титана

В табл. 3, 4 представлены параметры подшипников с предлагаемыми антифрикционными покрытиями в варианте редуктора для двигателя с пятью и шестью промежуточными шестернями соответственно. В обоих случаях частота вращения подшипников составляет 11 110 оборотов в минуту, используется масло марки МЮ-II с температурой на входе 100 °С. Потребная прокачка масла составляет 9,45 литров в минуту.

Таблица 3. Параметры подшипников для варианта редуктора с пятью промежуточными шестернями

Параметр подшипника		Величина параметра			
Нагрузка на подшипник ( $w$ ), кН		140,019			
Температура масла на входе ( $tb_x$ ), °С		100			
Угол подвода масла ( $al$ ), град		120			
Потребная прокачка масла ( $q$ ), л/мин		9,45			
Диаметр подшипника ( $d$ ), мм		85			
Скорость скольжения ( $u$ ), м/с		49,446			
Минимальный рабочий зазор ( $h_{min}$ ), мкм		18,5	15	12	10
Длина подшипника ( $L$ ), мм		105	92	80	71
Максимальное давление в слое смазки ( $P_{max}$ ), МПа		58,839	71,588	91,201	109,834
Радиальный монтажный зазор ( $C_m$ ), мкм		61,6	56,1	52,1	50
Средняя удельная нагрузка ( $pm$ ), МПа		15,649	17,883	20,633	23,204
Уровень вязкостного подогрева масла ( $tbi_x$ ), °С		118,664	121,443	124,216	126,305
Температура начала турбулентности ( $t_{kr}$ ), °С		134,4	144,389	152,92	158,092
Удельная мощность при граничном трении, ( $Nr$ ), кВт/см <sup>2</sup>	Карбид кремния	0,774	0,885	1,021	1,148
	Карбонитрид титана	5,419	6,192	7,144	8,034
	Диборид титана	3,87	4,423	5,103	5,739
Потери вязкостного трения ( $N$ ), кВт		8,17	7,78	7,35	6,99

Таблица 4. Параметры подшипников для варианта редуктора с шестью промежуточными шестернями

Параметр подшипника		Величина параметра			
Нагрузка на подшипник ( $w$ ), кН		125,132			
Температура масла на входе ( $tb_x$ ), °C		100			
Угол подвода масла ( $al$ ), град		120			
Потребная прокачка масла ( $q$ ), л/мин		9,45			
Диаметр подшипника ( $d$ ), мм		85			
Скорость скольжения ( $u$ ), м/с		49,446			
Минимальный рабочий зазор ( $h_{min}$ ), мкм		18,5	15	12	10
Длина подшипника ( $L$ ), мм		101	89	77	68
Максимальное давление в слое смазки ( $P_{max}$ ), МПа		54,917	66,685	85,317	101,008
Радиальный монтажный зазор ( $C_m$ ), мкм		61,6	56,1	52,1	50
Средняя удельная нагрузка ( $pm$ ), МПа		14,539	16,616	19,171	21,561
Уровень вязкостного подогрева масла ( $tbi_x$ ), °C		118,366	121,127	123,884	125,959
Температура начала турбулентности ( $t_{kr}$ ), °C		134,4	144,389	152,92	158,092
Удельная мощность при граничном трении, ( $Nr$ ), кВт/см <sup>2</sup>	Карбид кремния	0,719	0,822	0,948	1,067
	Карбонитрид титана	5,034	5,753	6,638	7,466
	Диборид титана	3,596	4,109	4,741	5,333
Потери вязкостного трения ( $N$ ), кВт		7,73	7,37	6,97	6,64

### Анализ результатов

Применение предлагаемых антифрикционных покрытий из КМК для поверхностей гидродинамических подшипников при технологически и эксплуатационно обеспеченном уменьшении минимального рабочего зазора может значительно увеличить среднюю удельную нагрузку подшипника, снизить теплоотдачу в прокачиваемое масло и обеспечить работу при минимальном количестве масла. За счёт этого стало возможным уменьшение осевых габаритов подшипников при одновременном повышении максимальных давлений в смазочном слое. Отметим, что это должно быть обеспечено не только свойствами материалов покрытий, но и свойствами материалов конструкции и самой конструкцией подшипников.

Как видно из рис. 7, ионно-вакуумное покрытие материалами на основе карбида кремния имеет явное преимущество перед остальными предлагаемыми покрытиями в условиях граничного трения. Минимальный коэффициент трения сравним с коэффициентом трения фторопласта со смазкой по стали, а коэффициент теплопроводности значительно выше, чем у других рассмотренных материалов покрытий.

Сравнение параметров данного подшипника с серийным образцом, применяемым в редукторах ГТД, представлено в табл. 5. Как видно из таблицы, по ряду параметров прирост эффективной работоспособности подшипника с карбидо-кремниевым покрытием составляет около 50% при уменьшении осевых размеров и необходимого радиального зазора.

С учётом того, что ионно-вакуумная имплантация является финишной операцией обработки поверхностей подшипника и при сохранении точности механической обработки поверхностей создаёт поверхностный слой с высокими механическими свойствами и сцеплением с основным материалом, покрытие поверхностей подшипников материалами на основе карбида кремния перспективно для тяжело нагруженных подшипников скольжения.



Таблица 5. Сравнение характеристик серийного и перспективного подшипника скольжения

Параметр подшипника	Серийный подшипник	Перспективный подшипник с покрытием на основе карбида кремния (для 5 шестерён)
Длина ( $L$ ), мм	85	71
Диаметр ( $d$ ), мм	78	85
Радиальный зазор ( $C_m$ ), мкм	80,5	50
Угол подвода масла ( $al$ ), град	110	120
Нагрузка на подшипник ( $w$ ), кН	73,49	140,019
Скорость скольжения ( $u$ ), м/с	56,03	49,449
Температура масла на входе ( $tb_x$ ), °С	98	100
Уровень вязкостного подогрева масла ( $tbi_x$ ), °С	107,7	126,305
Температура начала турбулентности ( $t_{kr}$ ), °С	100,78	158,092
Средняя удельная нагрузка ( $pm$ ), МПа	11,084	23,204
Удельная мощность граничного трения ( $Nr$ ), кВт/см <sup>2</sup>	0,683	1,148
Максимальное давление в слое масла ( $P$ ), МПа	53,936	109,834
Минимальный рабочий зазор ( $h_{min}$ ), мкм	15,52	10
Потери вязкостного трения ( $N$ ), кВт	4,791	6,99
Потребная прокачка масла ( $q$ ), л/мин	15,7	9,45

### Заключение

Работоспособность подшипников с покрытиями из КМК в составе редуктора ТРДД была подтверждена испытаниями на стенде, а именно: 100-часовыми испытаниями, соответствующими взлётному режиму; испытаниями, соответствующими режиму авторотации; испытаниями с температурой масла на входе 140°С; испытаниями по определению минимально необходимой прокачки масла для работы подшипника скольжения на взлётном режиме в течение 30 секунд; циклическими испытаниями.

Рассмотренные покрытия из КМК предоставляют возможности расширения границ работоспособности подшипника за счёт повышения точности изготовления геометрических размеров, прочности, износостойкости и увеличения характеристик сцепления с основным материалом, а также высокой механической и химической совместимости материалов покрытий и смазки. Всё это обуславливает уменьшение затрат на эксплуатацию, диагностику и замену подшипников в узлах газотурбинных двигателей.

### Библиографический список

1. Зубко А.И., Донцов С.Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Труды МАИ. 2014. № 74. <http://trudymai.ru/upload/iblock/146/14683fbf94f86d1be09bbbc801e1b75c.pdf>
2. Зубарев Г.И., Климов Д.А., Марчуков Е.Ю., Низовцев В.Е., Чуклинов С.В. Подшипник скольжения с наноструктурированным антифрикционным керамическим покрытием: патент РФ № 2476736; опубл. 27.02.2013; бюл. № 6.
3. Силуянова М.В., Фертиков А.О. Усовершенствование узлов трения силовых установок путём нанесения напыляемых покрытий из керамических композитов // Сб. тезисов докладов 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2017». М.: Люксор, 2017. С. 489-490.

## IMPROVEMENT OF FRICTION UNITS OF POWER PLANTS BY APPLYING CERAMIC COMPOSITE SPRAY COATINGS

© 2018

**M. V. Siluyanova** Doctor of Science (Engineering), Professor;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

**A. O. Fertikov** Master's Degree Student;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[alexfertikov@gmail.com](mailto:alexfertikov@gmail.com)

Modifying the working surface of a product by applying protective and functional coatings makes possible considerable changes in the mechanical, optical, electrical, magnetic, thermal and chemical properties of the original structural material, its real surface, producing articles with protective, for example, anti-corrosion, wear-resistant and other properties. We investigated the possibility of improving the friction units of aircraft power plants by applying nanostructured ceramic composite spray coatings. A heavily loaded bearing forming a part of the gearbox of a turbojet engine is used as a prototype of the friction unit. The advantages and drawbacks of improved friction units as compared to production models and their prototypes made according to an improved technology are assessed. The results obtained during the experimental work are presented. A positive conclusion is made about the use of nanostructured composite materials in the development of friction units; the most favorable method of coating is determined.

*Gas turbine engines; slide bearings; nanostructured ceramic composite.*

---

*Citation:* Siluyanova M.V., Fertikov A.O. Improvement of friction units of power plants by applying ceramic composite spray coatings. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 2. P. 122-131. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-122-131

### References

1. Zubko A.I., Doncov S.N. The analysis of the operability conditions and diagnostic development for the new generation ceramic bearings. *Trudy MAI*. 2014. No. 74. Available at: <http://trudymai.ru/upload/iblock/146/14683fbf94f86d1be09bbbc801e1b75c.pdf> (In Russ.).
2. Zubarev G.I., Klimov D.A., Marchukov E.Yu., Nizovtsev V.E. Chuklinov S.V. [Sliding bearing with nanostructured antifriction ceramic coating]. Patent RF, no. 2476736, 2013 (Publ. 27.02.2013, bull. no. 6).
3. Siluyanova M.V., Fertikov A.O. Improvement of friction units of power plants by applying spray coatings made of ceramic composites. *Abstracts 16th International Conference «Aviation and Cosmonautics – 2017»*. Moscow: Luxor Publ., 2017. P. 489-490 (In Russ.).