Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-9>
УДК 621.822.175

Р.Г. Чижиков, С.Я. Коваль, А.Н. Минаев

ЧИЖИКОВ РОМАН ГЕННАДЬЕВИЧ – научный сотрудник, e-mail: chizhikov@bk.ru
Институт химии ДВО РАН

Проспект 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, Россия, 690022

КОВАЛЬ СЕРГЕЙ ЯКОВЛЕВИЧ – генеральный директор ООО «ФЛЕРОН»,
e-mail: kv_s_ya@mail.ru

Бородинская, д. 46/50, офис 76, Владивосток, Россия, 690105

МИНАЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, AuthorID:79038, SPIN: 6289-2946,
ORCID: orcid.org/0000-0001-7327-8685, ResercherID: L-2513-2015, ScopusID: 57205055220,
e-mail: aminaev@mail.ru

Кафедра судовой энергетики и автоматики Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет (Институт химии ДВО РАН)

Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Увеличение ресурса подшипников на газовой смазке судового энергетического оборудования с помощью антифрикционных покрытий

Аннотация: Настоящая работа посвящена повышению ресурса газовых подшипников, применяемых в судовых турбомашинах. Авторы представляют эксперимент по измерению износостойкости покрытия рабочей поверхности газового подшипника: обосновывают выбор его методики и метода получения защитного покрытия. В результате проведенных исследований впервые установлены зависимости износостойкости покрытия от технологического процесса получения защитного покрытия.

Ключевые слова: газодинамический подшипник, скорость износа, сухое трение, плазменное электролитическое оксидирование, защитные покрытия.

Введение

Один из часто применяемых способов, позволяющих повысить технико-экономические показатели судовых энергетических установок, – увеличение рабочих оборотов судового энергетического оборудования, в том числе вспомогательного. Но при этом потери трения в подшипниковых узлах судовых энергетических установок возрастают, следовательно, нужно искать способы уменьшения потерь на трение. Один из них – применение подшипников на газовой смазке, потери в рабочем режиме которых на два-три порядка меньше, чем у жидкостных подшипников, а их рабочие параметры менее зависимы от внешних факторов.

При запуске и остановке подшипники газодинамического типа работают в режиме сухого трения, что уменьшает их ресурс до сотен или десятков пусков, например, как это приводится в [18], до 70 циклов, что является основным препятствием для широкого их внедрения в высокооборотные судовые машины [2]. Увеличение ресурса достигается рядом спосо-

бов: применение комбинированных жидкостно-газовых опор [17], оптимизация режимов работы, износостойкие покрытия, получаемые разными способами, например покрытия, состоящие из α - и γ -модификаций Al_2O_3 [20], напыление покрытий в плазменной струе [19], плазменное электролитическое оксидирование [9].

Виды антифрикционных покрытий. Отметим существенные недостатки технологий их нанесения на детали сложной формы с внутренними полостями.

- *Анодирование*: подходит не ко всем сплавам, так как используют агрессивные электролиты, скорость роста покрытий низкая, причем чем выше механические свойства, тем ниже, как правило, скорость роста [1].

- *Хромирование ионами Cr^{6+}* : крайне неэкологично, поскольку эти ионы относят к веществам 2-го и 1-го классов опасности. Применение Cr^{3+} дает менее твердые и износостойкие покрытия, что уменьшает ресурс, кроме того, экологическая нагрузка на производстве весьма велика [12, 15].

- *Фосфатные покрытия*: при всей простоте и экологичности нанесения отличаются крайне низкими прочностными параметрами и обеспечивают недостаточный ресурс покрытия.

- *Органические полимерные покрытия*: их применение ограничено ввиду слабых адгезионных и прочностных свойств фторсодержащих полимеров.

- *CVD-осаждение* (химическое газозафазное осаждение): проводится при крайне высоких температурах, использует при активации высокотоксичные компоненты [14].

- *PVD-осаждение* (вакуумное напыление): представляет собой более технологичный способ нанесения твердых покрытий, но ввиду особенностей технологии напыление на внутренние поверхности затруднено или невозможно.

Метод нанесения антифрикционного покрытия в жидком электролите на металлы вентильной группы – Al, Ti, Mg и сплавы на их основе, например широко применяющиеся сплавы АМг-3, АМг-5, АМг-6 и АМг-8. Технология плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) разработана и успешно применяется как в лабораторных, так и в промышленных условиях для создания на поверхности деталей покрытий, обладающих высокой твердостью, адгезией и когезией достаточной толщины (от единиц до сотен мкм) [8, 13, 16]. Метод позволяет получать покрытия на внутренних поверхностях деталей, в том числе групповым способом. В составе электролитов доля веществ повышенной опасности очень мала или они отсутствуют. По твердости и антифрикционным свойствам ПЭО-покрытия сравнимы с получаемыми методом PVD, но обработка проводится более технологично, значительно снижены требования по предварительной подготовке поверхности, очистке от жировых пятен, окислов.

Плазменное электролитическое оксидирование как метод защиты деталей судовых энергетических установок успешно применяется на производстве, например [13]. Вместе с тем в литературе не встречается описания случаев применения данного метода для увеличения ресурса подшипников с газовой смазкой.

Цель исследования – повышение эффективности работы упорных газодинамических подшипников в режиме сухого трения путём изменения характеристик рабочих поверхностей.

Эксперимент по измерению скорости износа ПЭО-покрытий деталей судовых энергетических установок

Процесс износа является вариативным и стохастическим, его значения определяются сочетанием трудноконтролируемых факторов и сложно поддаются прогнозу и измерению, кроме измерения интегрального. Поэтому в рамках настоящего исследования мы провели эксперимент, в ходе которого предполагали получить картину изменения характеристик рабочих поверхностей.

Эксперимент проводился в 2018–2019 гг. в лаборатории кафедры судовой энергетики и автоматики Инженерной школы ДВФУ.

Методика эксперимента включала следующие стадии:

- подготовка образцов;
- нанесение исследуемого покрытия;
- износ покрытия в контролируемых условиях;
- измерение износа;
- анализ полученных данных.

Основные машины и средства измерения. Применяемые в процессе эксперимента машины можно отнести к трем классам – станки подготовки, имитатор процесса износа, измерительные установки.

Станки подготовки: фрезерный станок с числовым программным управлением JD-3020, позволяющий получить образцы с малой погрешностью линейных размеров и высокой повторяемостью. Станок пробоподготовки Tegramin-25, на нем рабочая поверхность образцов была доведена до требуемых шероховатости и плоскостности. Муфельная печь Nobertherm для сушки образцов. Установка ИПВ-1000, на которой на поверхность образцов было нанесено исследуемое износостойкое покрытие.

Машина трения – лабораторное устройство для измерения момента трения, запатентованное авторами настоящей работы [10, 11]. Устройство позволяет управлять вращением контртела трения в полуавтоматическом режиме, когда оператор задает параметры вращения – время разгона и торможения, максимальную скорость, время работы на максимальной скорости, количество запусков, а установка проводит запуски и останавливается после завершения заданной программы.

Измерительные установки – вихретоковый толщиномер ВТ-201, бесконтактный лазерный профилометр Uniscan, система измерений, входящая в состав установки ИПВ-1000.

Методики измерений. Методики измерения основаны на соответствующих документах Государственной системы обеспечения единства измерений, в частности [5, 6], а методики тарирования экспериментальной установки – на [3, 4, 7].

Процесс нанесения защитного покрытия. Технологический процесс получения защитного покрытия осуществлялся с помощью технологии плазменного электролитического оксидирования (ПЭО-покрытия) на детали из сплава АМг-3, разработанной сотрудниками Института химии ДВО РАН под руководством С.В. Гнеденкова [9]. Он включает: подъем напряжения с постоянной скоростью до заданного уровня и выдержку при заданном напряжении в течение часа. Оксидирование происходит в водном электролите следующего состава, г/л; :

- силикат натрия 35;
- фторид натрия 0,5;
- тартрат натрия 10;
- тетраборат натрия 2.

В качестве независимого фактора эксперимента выбрано напряжение формирования покрытия, при варьировании которого достигаются наиболее значимые различия в толщине, морфологическом и химическом составе, а также в его физических свойствах. Граничные значения равны 450 и 550 В с шагом 25 В. Границы выбраны исходя из рекомендаций по применению электролита, шаг напряжения – по результатам установочных экспериментов и погрешности установки ИПВ-1000.

Результаты и обсуждение

Износ поверхности. Изнашивание поверхности образцов происходило на трибометрической установке в условиях, имитирующих сухой старт–стоп газодинамического подшипника малогабаритного судового турбокомпрессора, при номинальном давлении на рабочую поверхность, равном 44 кПа, температуре 20 ± 2 °С. Износ проводился до начала катастрофи-

ческого значения, характеризующегося резким повышением коэффициента трения и, как следствие, ростом амплитуды колебания образца с десятков микрометров до миллиметров.

В таблице приведены значения рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$, при котором получено покрытие, толщины покрытия S , величины линейного износа ΔS , количества оборотов до начала катастрофического износа $N_{\text{об}}$, скорости износа I , а также абсолютной ΔI и относительной ошибки ε_i определения скорости износа.

Зависимость толщины покрытия и скорости его износа от напряжения формирования

Серия, №	$U_{\text{раб}}$, В	S , мкм	ΔS , мкм	$N_{\text{об}}$, тыс. оборотов	I , нм/об.	ΔI , нм/об.	ε_i , %
1	450	27,2	11,1	68	0,163	0,0114	7
2	475	45,2	8,2	85	0,0968	0,0122	12
3	500	59,8	5,4	88	0,061	0,0084	14
4	525	84,6	7,3	79	0,092	0,0085	10
5	550	100,2	9,3	82	0,1134	0,0123	11
*	0	0	10,6	53	0,2	0,0363	18

Регрессионная модель зависимости линейной скорости износа ПЭО-покрытия от напряжения формирования покрытия:

$$I = 2,7886 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 2,8366 \cdot 10^{-2} \cdot U + 7,2806 \text{ нм/об.} \quad (1)$$

Графическое представление математической модели с границами, определяемыми погрешностью эксперимента, представлено на графике (см. рисунок). Также на графике отображены экспериментально полученные данные и результат проверки в оптимальной точке зависимости.

В данной работе использованы нестандартные единицы измерения скорости износа – нм/об, позволяющие вычислить средний износ покрытия при модельных условиях, в частности при заданной нагрузке на поверхность трибосопряжения в зависимости от параметров пуска и остановки ротора (длительности и углового ускорения). Вместе с тем возможен переход от используемых единиц к стандартным единицам измерения – $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при помощи коэффициента $k_{\text{ст}} = 4,12 \cdot 10^{-3}$, учитывающего конструктивные параметры экспериментальной установки. Таким образом, преобразование от линейного износа I_l , принятого в данной работе, к объемному износу I_v показано в формуле (2):

$$I_v = 4,12 \cdot 10^{-5} \cdot I_l \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м}). \quad (2)$$

График модели зависимости и экспериментальные данные.

Перед определением достоверности модели данные были проверены на соответствие нормальному закону распределения в каждом интервале.

Погрешности измерения и статистическая достоверность. Расчеты для каждой точки выполнены исходя из количества измерений (в одной точке $N=5$), с доверительной вероятностью $\gamma=0,95$, коэффициентом Стьюдента $t_{\gamma,n-1}=2,78$. Ошибки измерения: напряжение (прямое измерения) $U_{\text{раб}} - 2\%$, величина износа $- 0,2$ мкм, число оборотов $-$ не превышает 1000. Таким образом, в погрешности измерения скорости износа наибольшая доля приходится на случайную погрешность, остальные составляющие характеризуются величинами не более $1/10$ от случайной ошибки измерения. Критерий Фишера составляет 18,2 при критическом его значении 6,39 для уровня значимости 0,05, что позволяет сделать вывод о состоятельности представленной нами математической модели, приведенной в формуле (1).

С помощью анализа математической модели **был определен** экстремум функции скорости износа от напряжения формирования, составивший 508 В.

Проверка результатов

В рамках проверки результатов – подтверждающего эксперимента – мы провели испытание покрытия с оптимальным напряжением формирования, равным 510 ± 10 В. Покрытие прошло истирание, переход износа на стадию катастрофического зафиксирован через 89 тысяч оборотов (93 цикла запуска–остановки), износ покрытия составил 6,2 мкм, скорость износа $- 0,70 \pm 0,08$ нм/об. Модельное значение $- 0,067$ нм/об, что подтверждает адекватность модели и экспериментальных данных. **Ресурс покрытия, выраженный в числе запусков, превосходит известные показатели на 20–30%.**

Заключение

Для увеличения ресурса работы подшипников на газовой смазке, повышающих технико-экономические характеристики высокооборотных судовых энергетических установок, но имеющих ограниченный срок эксплуатации из-за сухого трения рабочих поверхностей, мы выбрали метод плазменного электролитического оксидирования, который изменяет рабочую поверхность подшипника. Проведен физический эксперимент по измерению скорости износа покрытия в зависимости от технологических параметров его нанесения. На основании результатов эксперимента построена математическая модель зависимости скорости износа от напряжения формирования покрытия, найдено оптимальное значение напряжения, подтверждена адекватность модели. Результат: существенно увеличен ресурс работы подшипника на газовой смазке за счет применения износостойкого покрытия, нанесенного с помощью плазменного электролитического оксидирования.

Полученные результаты позволяют рекомендовать нанесение защитных покрытий для подшипников на газовой смазке на рабочем участке по нанесению защитных покрытий в элементах морской техники Дальневосточного завода «Звезда».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккозиев И.А., Жээнбеков А.А., Демьянович П.Д., Демьянович Д.П. Анодирование алюминия и его сплавов // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17, № 5. С. 61–63.
2. Бесчастных В.Н. Опыт проектирования подшипников на газовой смазке // Актуальные вопросы современных физико-математических и естественных наук: сб. материалов междунар. симпозиума / под ред. Ю.А. Фёдорова. Киров: Междунар. центр науч.-исслед. проектов, 2015. С. 29–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24088432> (дата обращения: 09.10.2019).
3. ГОСТ 8.129-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.
4. ГОСТ 8.567-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения.
5. ГОСТ Р 8.563-2009. ГСИ. Методики выполнения измерений.

6. ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
7. ГОСТ Р 8.796-2012. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерители крутящего момента силы. Методика поверки.
8. Дударева Н.Ю., Кальщиков Р.В., Мусин Ф.Ф., Гринь Р.Р. Адгезионная прочность плазменного электролитического покрытия, сформированного на высококремнистом сплаве методом микродугового оксидирования // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. 2014. № 10(93). С. 38–43.
9. Егоркин В.С., Вялый И.Е., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Формирование твердых, износостойких ПЭО-покрытий на сплаве алюминия АМг3 // Вестник ДВО РАН. 2015. № 4. С. 53–61.
10. Пат. № 176674 Российская Федерация. Устройство для измерения момента трения / М.В. Грибиниченко, А.Н. Минаев, О.С. Портнова, С.Я. Коваль, Р.Г. Чижилов, И.Ю. Кучеренко; Дальневост. федерал. ун-т; заявл. 11.07.2017, № 2017124407, опубл. 25.01.2018.
11. Пат. № 177417 Российская Федерация. Устройство для измерения момента трения / М.В. Грибиниченко, А.Н. Минаев О.С., Портнова, С.Я. Коваль, Р.Г. Чижилов, И.Ю. Кучеренко; Дальневост. федерал. ун-т; заявл. 11.07.2017, № 2017124406, опубл. 21.02.2018.
12. Поляков Н.А., Паутов Д.В., Ляхов Б.Ф. Наводороживание покрытий и стальной основы в процессе хромирования из растворов Cr(III) // Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения металлов и сплавов: сб. тезисов конф. / М.: Ин-т физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 2017. С. 70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35641347> (дата обращения: 10.09.2019).
13. Портнова О.С., Минаев А.Н. Плазменное электролитическое оксидирование как метод формирования защитных покрытий на титане для элементов судового энергооборудования // Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития: сб. тр. конф. Вып. 2. Волгоград: Иновационный центр развития образования и науки, 2015. С. 44–46.
14. Редькин А.Н., Корепанов В.И., Якимов Е.Е., Рошупкин Д.В. Пьезоэлектрические характеристики и текстура поликристаллических пленок нитрида алюминия, выращенных простым CVD методом // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18, № 1. С. 20–23.
15. Салахова Р.К. Хромирование в электролите, содержащем соли трехвалентного хрома и нанопорошки, как альтернатива хромированию из стандартных электролитов // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 1. С. 77–82.
16. Титов Н.В. Повышение износостойкости поршней ДВС из алюминиевых сплавов плазменным электролитическим оксидированием // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2017): 9-я Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 октября 2017: сб. ст. Курск: Университетская книга, 2017. С. 224–228. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30530764> (дата обращения: 02.10.2019).
17. Chapman P.A. Advanced Gas Foil Bearing Design for Supercritical CO₂ Power Cycles. Univ. Turbine Systems Research Workshop. Nov. 1–3, 2016. Blacksburg, VA.
18. Hooshang Heshmat, Hryniewicz P., Walton James F. II, Willis John P., Jahanmir S., DellaCorte Ch. Low-friction wear-resistant coatings for high-temperature foil bearings. Tribology International. 2005;38:1059–1075.
19. Nilsson D., Svahn F., Wiklund U., Hogmark S. Low-friction carbon-rich carbide coatings deposited by co-sputtering. Wear. 2003;254:1084–1091.
20. Rajendran R. Gas turbine coatings, an overview. Engineering Failure Analysis. 2012;26:355–369. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.007

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-9>

Chizhikov R., Koval S., Minaev A.

ROMAN CHIZHIKOV, Researcher, e-mail: chizhikov@bk.ru

Institute of Chemistry, FEB RAS

159 Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok, Russia, 690022

SERGEY KOVAL, General Manager, FLERON Ltd, e-mail: kv_s_ya@mail.ru

46 / 50 Borodinskaya, Office76, Vladivostok, Russia, 690105

ALEXANDER MINAEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor,

Department of Ship Power and Automation, School of Engineering,

ORCID: orcid.org/0000-0001-7327-8685, ResearcherID: L-2513-2015,ScopusID: 57205055220, e-mail: aminaev@mail.ru

Far Eastern Federal University (Institute of Chemistry, FEB RAS)

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia 690091

159, Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok, Russia, 690022

Increase of service life of gas-lubricated bearings of onboard power equipment by application of antifriction coatings

Abstract: The present article is dedicated to the problem of service life extension for gas-lubricated bearings used in onboard turbines. Substantiation of selection of particular method of obtaining the protective coating for the working surface of a gas-lubricated bearing is presented as well. Dependence of wear resistance of the coating on the process and technology of the protective coating production is described.

Keywords: gas-dynamic bearing, wear speed, dry friction, plasma electrolytic oxidation, protective coatings.

REFERENCES

1. Akkoziev I.A., Jeenbekov A.A., Demianovich P.D., Demianovich D.P. Anodizing of aluminum and its alloys. KRSU Bulletin. 2017;17(5):61–63.
2. Beschastnyih V.N. Experience in designing gas-lubricated bearings. Actual problems of modern physical, mathematical and natural sciences. Intern. Symposium, ed. Yu.A. Fedorov. Kirov, Intern. Center for Scientific Research projects, 2015, p. 29–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24088432> – 10.09.2019.
3. GOST 8.129-2013. State system for ensuring uniform measurement. State verification scheme for time and frequency measurement instrumentation.
4. GOST 8.567-2014. State system for ensuring uniform measurement. Time and frequency measurements. Terms and definitions.
5. GOST R 8.563-2009. State system for ensuring uniform measurement. Measurement procedure.
6. GOST R 8.596-2002. State system for ensuring uniform measurement. Metrological assurance for measuring systems. Main principles.
7. GOST R 8.796-2012. State system for ensuring uniform measurement. Torque measuring devices. Verification procedure.
8. Dudareva N., Kalshchikov R., Musin F., Grin R. Adhesive strength of plasma electrolytic coating formed on high-silicon alloy by micro-arc oxidation. IrGTU Bulletin. 2014(93):38–43.
9. Egorkin V.S., Vyaliy I.E., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Formation of the hard, wear-proof PEO-coatings on aluminium alloy AMg3. Bulletin of FEB RAS. 2015;4:53–61.

10. Patent for invention Russian Federation N176674. Friction torque measuring machine. Gribinichenko M.V., Minaev A.N., Portnova O.S., Koval S.Y., Chizhikov R.G., Kucherenko I.U. Publ. 25.01.2018.
11. Patent for invention Russian Federation N177417. Friction torque measuring machine. Gribinichenko M.V., Minaev A.N., Portnova O.S., Koval S.Y., Chizhikov R.G., Kucherenko I.U. Publ. 21.02.2018.
12. Polyakov N., Pautov D., Luyakhov B. Hydrogenation of coating and steel base during chrome plating from Cr(III) solutions. Fundamental and applied problems of electrochemical and chemical-catalytic deposition of metals and alloys. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS. 2017, p. 70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35641347> – 10.09.2019.
13. Portnova O., Minaev A. Plasma electrolytic oxidation as a method of forming protective coatings on titanium for ship power equipment. Technical Sciences: trends, prospects and technologies of development. Proceeding of the international scientific and practical conference. 2015. P. 44–46.
14. Redkin A., Korepanov V., Yakimov E., Roshchupkin D. Piezoelectric characteristics and texture of polycrystalline aluminum nitride films grown by simple CVD method. Fundamental Problems of Electronic Instrumentation. 2018;1(18):20–23.
15. Salakhova R. Chrome plating in the electrolyte, containing salts of trivalent chrome & nanopowders, as alternative to chrome plating in standard electrolyte. Samara Scientific Center Bulletin. 2008;1:77–82.
16. Titov N. Increase of wear resistance of internal combustion engine pistons made of aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation. SAMIT-2017. Proceeding of IX International scientific-technical conference. 2017, p. 224–228. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30530764> – 02.10.2019.
17. Chapman P.A. Advanced Gas Foil Bearing Design for Supercritical CO₂ Power Cycles. Univ. Turbine Systems Research Workshop. Nov. 1–3, 2016. Blacksburg, VA.
18. Hooshang Heshmat, Hryniewicz P., Walton James F. II, Willis John P., Jahanmir S., DellaCorte Ch. Low-friction wear-resistant coatings for high-temperature foil bearings. Tribology International. 2005;38:1059–1075.
19. Nilsson D., Svahn F., Wiklund U., Hogmark S. Low-friction carbon-rich carbide coatings deposited by co-sputtering. Wear. 2003;254:1084–1091.
20. Rajendran R. Gas turbine coatings, an overview. Engineering Failure Analysis. 2012;26:355–369. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.007