Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-8>
УДК 621.822.175

О.С. Портнова, М.В. Грибиниченко, Д.В. Машталяр, К.В. Надараиа, В.С. Филонина

ПОРТНОВА ОЛЕСЯ СЕРГЕЕВНА – старший преподаватель, AuthorID: 923140,

SPIN: 7989-1406, ResercherID: G-4660-2017, e-mail: olesya.portnova@mail.ru

ГРИБНИЧЕНКО МАТВЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой,

AuthorID: 639456, SPIN: 8038-4960, e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Кафедра судовой энергетики и автоматики Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, Приморский край, 690091

МАШТАЛЯР ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, заведующий лабораторией,

AuthorID: 199474, SPIN: 5930-2987, ORCID: 0000-0001-9645-4936,

ResercherID: A-5314-2014, ScopusID: 6504093612, e-mail: madiva@inbox.ru

ФИЛОНИНА ВАЛЕРИЯ СТАНИСЛАВОВНА – магистрант,

младший научный сотрудник, e-mail: filonina.vs@gmail.com

НАДАРАИА КОНСТАНТИНЭ ВАХТАНГОВИЧ – к.х.н., старший научный сотрудник,

AuthorID: 741709, SPIN: 7856-2069, ORCID: 0000-0001-7835-2231,

ResercherID: D-8392-2014, ScopusID: 56349269900, e-mail: nadaraiakv@mail.ru

Институт химии ДВО РАН

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

Повышение ресурса осевых газовых подшипников с антифрикционным покрытием на основе плазменного электролитического оксидирования: физический эксперимент

Аннотация: Рассматривается повышение ресурса и надежности осевых подшипников с газовой смазкой путем снижения негативного влияния режимов сухого трения на состояние рабочих поверхностей подшипника. Авторы, выбрав защитное антифрикционное покрытие подшипника, полученное методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО), провели физический эксперимент по определению трибологических характеристик – момента трения и скорости износа. В результате определена возможность применения ПЭО-покрытия для осевых газовых подшипников в режиме сухого трения, получены эмпирические коэффициенты для определения износа и момента трения рабочих поверхностей. На основании результатов экспериментов авторами предложена методика расчета и оптимизации параметров газовых опор роторов судовых турбомашин, работающих при режимах сухого трения и режимах газовой смазки. Методика, полагают авторы, оптимальна для расчета формы смазочного зазора и трибологических характеристик выбранного защитного покрытия.

Ключевые слова: газовая смазка, сухое трение, плазменное электролитическое оксидирование, осевой подшипник, эмпирические коэффициенты, методика расчета газовых опор.

Обзор состояния вопроса

Проектирование газовой опоры – многоплановая междисциплинарная задача из областей газодинамики, трибологии, механики деформируемого твердого тела, теоретически и экспериментально решается довольно широким кругом авторов. Мы, в свою очередь, ранее провели обзор по проблеме снижения негативного влияния режима сухого трения в газовых подшипниках [13], который позволил наметить последующие направления исследований. *Первое* – снижение продолжительности работы подшипника в режиме сухого трения, т.е. обеспечение возможно более раннего всплытия ротора на газовом слое (снижение частоты всплытия ротора). Для этого мы предложили применять газодинамические или гибридные подшипники с профилированием рабочей поверхности клиновидными участками, в которых на малых оборотах ротора возможно обеспечить проявление газодинамического эффекта. Данный эффект заключается в повышении давления в смазочном слое в результате сжатия газа, увлекаемого в сужающийся смазочный зазор. Для снижения негативного воздействия сухого трения необходимо обеспечить как можно более раннее возникновение газодинамического эффекта при разгоне ротора. Это достигается оптимизацией профиля рабочей поверхности. Результаты исследований по первому направлению рассмотрены в работе [2].

Второе направление связано с применением эффективного антифрикционного покрытия, которые более подробно мы и рассмотрим в настоящей статье.

Работы в области применения антифрикционных покрытий проводятся как в России, так и за рубежом, в настоящее время предложено множество покрытий и материалов [4–6, 8–12, 14]. Информация о технологиях зачастую закрыта для широкого распространения, в то же время отечественной промышленности необходимы технологии, доступные широкому кругу организаций, занимающихся созданием турбомашин различного назначения. Поэтому для своих экспериментов и дальнейших исследований мы выбрали технологию композиционного покрытия на основе плазменного электролитического оксидирования, которая разрабатывается в Институте химии ДВО РАН (ПЭО) [1, 6, 7] и позволяет создавать антифрикционные покрытия с высокими трибологическими характеристиками. В процессе создания ПЭО-слоя на поверхности покрываемой детали образуются плазменные разряды. Высокая температура и давление, возникающие в канале разряда, позволяют внедрить в поверхность образца компоненты электролита. Это дает возможность, меняя составы электролита, воздействовать на характеристики получаемого покрытия и создавать защитные покрытия с необходимыми параметрами твердости, адгезионной стойкости, шероховатости и т.д.

Цель настоящей статьи – повышение ресурса осевых газовых подшипников с помощью применения антифрикционного покрытия на основе плазменного электролитического оксидирования.

Прежде всего нам необходимо решить следующие задачи:

- провести эксперимент для определения зависимостей момента трения и износа рабочей поверхности подшипника от режимных и конструктивных параметров;
- на основе данных эксперимента определить коэффициенты, характеризующих трение и износ пары трения;
- применить полученные коэффициенты для повышения ресурса осевых подшипников на газовой смазке, используя их в методике проектирования.

Физический эксперимент по определению трибологических характеристик подшипников

Этот эксперимент включал два этапа.

Первый: определение зависимостей момента трения и износа рабочей поверхности подшипника в режиме сухого трения.

Второй: оценка работоспособности узлов трения с антифрикционными композиционными покрытиями в режимах перехода к сухому трению на высоких частотах вращения турбомашин.

Первый этап. С помощью экспериментальной установки (первой из двух разработанных авторами [13]) проводилась оценка трибологических характеристик осевых опор (профилированных и непрофилированных) с рассматриваемым антифрикционным покрытием (покрытие на основе плазменного электролитического оксидирования) и определялись эмпирические коэффициенты, характеризующие момент трения и износ рабочей поверхности. На данном этапе мы использовали методы тензометрирования и микрометрирования, с помощью которых определяли момент трения и износ рабочих поверхностей.

Полученные значения коэффициентов используются в разрабатываемой методике расчета и оптимизации параметров газовых опор роторов судовых турбомашин.

Второй этап. Оценку работоспособности узлов трения с антифрикционными композиционными покрытиями в режимах перехода к сухому трению на высоких частотах вращения турбомашин мы проводили на второй экспериментальной установке [3].

Обсуждение результатов

Результат первого этапа физического эксперимента (на первой установке) – получение зависимости момента трения и скорости износа осевых подшипников с профилированной и непрофилированной рабочей поверхностью от геометрических параметров и от нагрузки (рис. 1).

Кроме экспериментальных данных на графике (рис. 1) отмечены линии, построенные по точкам математического ожидания (принимаются равными средним арифметическим значениям), а также границы доверительного интервала, построенного для доверительной вероятности 0,95.

Рис. 1. Зависимость момента трения от наружного радиуса R_2 ; непрофилированная поверхность:

1 – экспериментальные данные, 2 – их среднее арифметическое значение; 3 – границы доверительного интервала ($\alpha=0,95$); профилированная поверхность: 1' – экспериментальные данные, 2' – их среднее арифметическое значение; 3' – границы доверительного интервала ($\alpha=0,95$); геометрические и режимные параметры:

$R_1=5$ мм; $F=80$ Н; $n=4000$ мин⁻¹, для профилированного подшипника число секторов 3, относительная протяженность клиновидного участка 0,55, $Sa=1,26$ мкм.

Здесь и далее – иллюстративный материал авторов.

Для подшипников с непрофилированной рабочей поверхностью в границах исследуемого диапазона внешнего радиуса момент трения возрастает на 30–40% при увеличении наружного радиуса, при этом зависимость близка к линейной.

Приблизительно такое же значение имеет и интенсивность увеличения момента трения при уменьшении внутреннего радиуса непрофилированных подшипников.

Для подшипников с профилированной рабочей поверхностью значение интенсивности роста момента трения при изменении геометрических параметров ниже и составляет примерно 20%.

На основании результатов измерения момента трения было получено значение коэффициента трения $f_{тр}$ пары хромированная сталь марки 40Х–титан с композиционным антифрикционным покрытием на основе ПЭО, которое составило в среднем $0,040 \pm 0,013$.

Также была проведена оценка коэффициента, характеризующего момент трения профилированной поверхности. Среднее значение этого коэффициента составило $0,027 \pm 0,011$.

На рис. 2 показана зависимость скорости износа от внешнего радиуса R_2 для подшипника с профилированной и непрофилированной рабочей поверхностью.

Значение скорости износа находится в пределах от 2 до 4 мм/с для различных параметров. В целом поверхность с покрытием на основе технологии ПЭО показала адгезионную стойкость, износ поверхности при проведении эксперимента проходил плавно, без каких-либо интенсивных или катастрофических разрушений (сколов, трещин и т.д.).

Рис. 2. Зависимость износа от наружного радиуса R_2 ; непрофилированная поверхность: 1 – экспериментальные данные, 2 – их среднее арифметическое значение; 3 – границы доверительного интервала ($\alpha=0,95$); профилированная поверхность: 1' – экспериментальные данные, 2' – их среднее арифметическое значение; 3' – границы доверительного интервала ($\alpha=0,95$); геометрические и режимные параметры: $R_1=8$ мм; $F=80$ Н; $n=4000$ мин $^{-1}$, для профилированного подшипника число секторов 3, относительная протяженность клиновидного участка 0,55, $Sa=1,26$ мкм.

Для профилированной поверхности изменение скорости износа при увеличении наружного радиуса от 0,015 м до 0,025 м достигает 60%, для непрофилированной – 40%. При этом с уменьшением значения наружного радиуса наблюдается некоторое увеличение скорости износа.

Значение коэффициентов для непрофилированной поверхности составило $1,334 \cdot 10^{-9} \pm 0,490 \cdot 10^{-9}$, для профилированной поверхности – $2,389 \cdot 10^{-9} \pm 0,553 \cdot 10^{-9}$.

Результат второго этапа: антифрикционное покрытие на основе технологии ПЭО выдержало кратковременные касания рабочих поверхностей на высоких частотах вращения подшипника, другими словами, нами была доказана работоспособность покрытия в режиме сухого трения на рабочих частотах газовых подшипников. Нами определены примерные границы надежной работы подшипника с таким антифрикционным покрытием.

Заключение

Получены зависимости трибологических характеристик подшипников с антифрикционными покрытиями ПЭО (момента трения и износа рабочей поверхности) от конструктивных и режимных параметров, позволяющие проводить анализ работы газового подшипника на пусковых и остановочных режимах.

На основании результатов измерения момента трения на режимах малых оборотов, соответствующих частоте всплывания ротора, получены значения коэффициента трения пары хромированная сталь марки 40Х–титан с композиционным антифрикционным покрытием на основе ПЭО, также проведена оценка коэффициента, характеризующего трение профилированной поверхности.

На основании результатов измерения скорости износа получены значения коэффициентов k , характеризующих скорость износа рабочих поверхностей.

Значения коэффициентов трения и износа позволяют проводить оценку работы осевого газового подшипника в режиме сухого трения, определять трибологические характеристики (момент трения и скорость линейного износа).

Полученные зависимости и эмпирические коэффициенты можно использовать для проектирования высокоэффективных газовых подшипников. Авторами предлагается использовать экспериментальные данные в методике проектирования газовых подшипников.

Дальнейшее направление исследований направлено на более глубокий анализ границ работоспособности композиционного покрытия на основе ПЭО, уточнение значений коэффициентов, характеризующих износ и момент трения.

Вклад авторов в статью: О.С. Портнова – постановка цели и задач исследования, изготовление экспериментальных установок и образцов для проведения исследований, проведение физических экспериментов, анализ результатов, работа с текстом; М.В. Грибиниченко – общий контроль, постановка цели и задач исследования, участие в проведении физических экспериментов, работа с текстом; Д.В. Машталар – организация работ по созданию защитного композиционного покрытия на основе технологии ПЭО; К.В. Надараиа – выполнение работ по формированию покрытия на экспериментальных образцах на основе плазменного электролитического оксидирования; В.С. Филомина – выполнение работ по нанесению ультрадисперсного политетрафторэтилена на исследуемые образцы для формирования композиционного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л., Нистратова М.В., Пузь А.В. Применение метода плазменного электролитического оксидирования для формирования на поверхности титановых сплавов кальций-фосфатных покрытий // Сб. тр. XII Межрегион. конф. молодых ученых, Владивосток, 17–20 июня 2009. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 275–280.
2. Портнова О.С., Грибиниченко М.В., Куценко Н.В., Нитяговский А.В. Снижение продолжительности режима сухого трения осевых газовых подшипников при пусках и остановках турбомашин // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2(44), т. 2. С. 50–54.
3. Чабанов А.А., Гладкова Н.А., Грибиниченко М.В., Куренский А.В. Экспериментальная установка для исследования характеристик подшипников с газовой смазкой // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2013. № 1(14). С. 44–48. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/1-14/9/> (дата обращения: 15.10.2019).
4. Ajayi O., Woodford J., Ali Erdemir, Fenske G. Performance of Amorphous Carbon Coating in Turbocompressor Air Bearings, Energy Technology Division, Argonne National Laboratory, 2001. URL: <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2001/12/41387.pdf> – 12.01.2018.
5. DellaCorte C., Malcolm K., Thomas F., Brian J. The Effect of Composition on the Surface Finish of PS400: A New High Temperature Solid Lubricant Coating: Prepared for the 65th Annual Meeting and Exhibition sponsored by the Society of Tribologists and Lubrication Engineers. Las Vegas, Nevada, May 16–20, 2010, 18 p.
6. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Kiryukhin D.P., Buznik V.M., Kichigina G.A., Kushch P.P. Composite coatings formed using telomeric tetrafluoroethylene solutions through plasma electrolytic oxidation. Russian J. of Inorganic Chemistry. 2015(60);8:975–986.

7. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Tsvetnikov A.K., Minaev A.N. Effect of Conditions of Treatment with Ultrafine Polytetrafluoroethylene on Properties of Composite Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2010(46); 7:823–827.
8. Heshmat H., Hryniewicz P., Walton J., DellaCorte C. Low-friction wear-resistant coatings for high-temperature foil bearings. *Tribology International*. 2006(38);11–12:1059–1075.
9. Heshmat H., Jahanmir S., Walton J. Coatings for High Temperature Foil Bearings. ASME Paper GT2007-27975. Proceedings of the ASME Turbo Expo. Power for Land, Sea & Air. Montreal, Canada, May 2007, vol. 5, p. 971–976.
10. Jacob S. Application of Tribology in Foil Bearing Technology: Northeastern Univ., Dept. of Mechanical and Industrial Engineering. ME5656 – Mechanics of Contact and Lubrication, 2011. URL: http://www1.coe.neu.edu/~smuftu/docs/2011/ME5656_Term_Project_Foil_Bearing_Technology.pdf – 10.01.2018.
11. Jahanmir S., Heshmat H., Heshmat C. Assessment of Tribological Coatings for Foil Bearing. Mohawk In-novative Technology Inc – Tribology Transactions. 2009. URL: http://www1.coe.neu.edu/~smuftu/docs/2011/ME5656_Term_Project_Foil_Bearing_Technology.pdf – 16.01.2018.
12. Jahanmir S., Heshmat H., Heshmat C., Eryilmaz O., Erdemir A. Evaluation of DLC Coatings for Foil Bearing Applications. Proceedings of International Joint Tribology Conference, San Diego, CA, Paper No. IJTC20076-44035, ASME, New York, 2007, p. 5–7.
13. Minaev A., Chizhikov R., Portnova O. Multifunctional Coatings for Gas-Lubricated Bearings Used in Marine Equipment. *Procedia Engineering*. 2017(206):746–751.
14. Radil K., DellaCorte C. The Performance of PS400 Subjected to Sliding Contact at Temperatures from 260 to 927 °C. *Tribology Transactions*. 2017(60);6:957–964.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2019. N 4/41

Ship Power Plants

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-8>

Portnova O., Gribinichenko M., Mashtalyar D., Nadaraia K., Filonina V.

OLESYA PORTNOVA, Senior Lecture, AuthorID: 923140, SPIN: 7989-1406,

ResercherID: G-4660-2017, e-mail: olesya.portnova@mail.ru

MATVEI GRIBINICHENKO, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

Head of Department, AuthorID: 639456, SPIN: 8038-4960,

e-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru

Department of the Ship's Power and Automation Department, School of Engineering
Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

DMITRY MASHTALYAR, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

AuthorID: 199474, SPIN: 5930-2987, ORCID: 0000-0001-9645-4936,

ResercherID: A-5314-2014, ScopusID: 6504093612, e-mail: madiva@inbox.ru

VALERIA FILONINA, Master Student, Junior Researcher, e-mail: filonina.vs@gmail.com

KONSTANTINE NADARAIA, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

AuthorID: 741709, SPIN: 7856-2069, ORCID: 0000-0001-7835-2231,

ResercherID: D-8392-2014, ScopusID: 56349269900, e-mail: nadaraia@dvfu.ru

Institute of Chemistry, FEB RAS

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

Physical experiment to study the tribological characteristics of composite antifriction coatings of gas bearings operating in the dry friction mode

Abstract: The problems of increasing the resource and reliability of axial bearings with gas lubrication by reducing the negative impact of dry friction on the condition of the working surfaces of the bearing are considered. The authors have selected a protective antifriction coating obtained by plasma electrolytic oxidation (PEO) and conducted a physical experiment to study the tribological characteristics of antifriction coatings. The authors analyzed the results of the experiment to find

out the possibility of using PEO coatings for axial gas supports. The empirical coefficients were obtained to determine the wear of the coating and the friction moment. The analysis is based on the study of the friction moment and wear rate at low bearing speeds. To illustrate the findings, some experimental results are presented in graphical form: the dependences of the friction moment arising from direct contact of the axial bearing working surfaces and the wear rate on the outer radius are shown. Based on the results of the experiments, a method for calculating and optimizing the parameters of the gas supports of the rotors of ship turbomachines operating under dry friction and gas lubrication modes is proposed. The methodology includes the calculation and optimization of the shape of the lubricating gap and the calculation of the tribological characteristics of the selected protective coating.

Keywords: gas lubrication, physical experiment, dry friction, plasma electrolytic oxidation, axial bearing, empirical coefficients.

REFERENCES

1. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov S.L., Nistratova M.V., Puz A.V. The use of plasma electrolytic oxidation method for the formation of calcium-phosphate coatings on the surface of titanium alloys. Proceedings of the XII Interregional Conf. of Young Scientists on the Physics of Semiconductor, Dielectric and Magnetic Materials. Vladivostok, June 17–20, 2009. Vladivostok, Dalnauka, 2009, p. 275–280.
2. Portnova O.S., Gribinichenko M.V., Kutsenko N.V., Nityagovsky A.V. Reducing the duration of dry friction of axial gas bearings during starts and stops of turbomachines. Marine Intellectual Technology. 2019(2);44:50–54.
3. Chabanov A.A., Gladkova N.A., Gribinichenko M.V., Kurensky A.V. An experimental setup for studying the characteristics of gas-lubricated bearings. School of Engineering Bulletin. 2013;1:44–48. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/1-14/9/> –15.10.2019.

For a complete list of references, see the previous page.