

Портнова О.С., Грибиниченко М.В.
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОВЫХ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ ТУРБОМАШИН

Рассматриваются вопросы применения антифрикционных покрытий для повышения эффективности работы газовых подшипников судовых турбомашин. При запуске машины до образования газового слоя подшипник работает в режиме сухого трения, который является сложным, вызывает искажение геометрических характеристик и, следовательно, ведет к изменению несущей способности и жесткости смазочного слоя. Для решения этой проблемы необходимо применение защитных покрытий и материалов, обладающих определенными характеристиками.

Приведен обзор технологий применяемых материалов и покрытий, методы исследований этих покрытий, а также описание экспериментальной установки, моделирующей узел трения осевого газового подшипника, работающего в режиме сухого трения. Основной характеристикой, измеряемой с помощью установки, является момент трения, возникающий при контакте пяты и подпятника при различных режимных и конструктивных параметрах изучаемого узла. Показана динамика изменения момента трения и частоты вращения от времени в паре трения бронза и сталь.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, газовая смазка, коэффициент трения, осевой подшипник, трибологическая характеристика, момент трения, трибологическая экспериментальная установка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Портнова О.С., Грибиниченко М.В. Исследование защитных покрытий газовых подшипников судовых турбомашин. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 151–156.

УДК 621.125:621.82

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-151-156

Portnova O., Gribinichenko M.
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

INVESTIGATION OF PROTECTIVE COATINGS FOR GAS-LUBRICATED BEARING OF SHIP'S TURBO-MACHINES

The paper considers issues related to the use of antifriction coatings for more efficient performance of gas-lubricated bearings in ship's turbo-machines. When a machine is started its bearings operate in dry friction mode until a gas film is formed. It is a heavy-duty mode causing geometric distortions and affecting the bearing capacity and lubricating film stiffness. This problem is solved by application of protective coatings and materials of certain properties.

The paper reviews available material and coating technologies, methods for investigation of these coatings, as well as describes an experimental setup modelling a friction unit of axial gas bearing running in the dry friction mode. The main characteristic measured on this experimental rig is the friction moment between thrust bearing and end journal for various running modes and design parameters of this assembly. Variation of the friction moment and rpm with time in the bronze-steel friction assembly is shown.

Key words: antifriction coating, gas lubrication, friction coefficient, axial bearing, tribological characteristic, friction moment, tribological experiment setup.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Portnova O., Gribinichenko M. Investigation of protective coatings for gas-lubricated bearing of ship's turbo-machines. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; special issue 1: 151–156 (in Russian).

UDC 621.125:621.82

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-151-156



Введение

Introduction

Актуальность темы исследования связана с необходимостью повышения экономичности энергетического оборудования, что в последнее время приобрело особую остроту в связи с повышением стоимости и ограниченностью топливных ресурсов. Актуальность определяется направленностью работы на решение проблем, связанных с разработкой энергетических комплексов с высокоэффективными энергетическими установками и необходимостью модернизации действующих комплексов, что требует выбора объективно лучших технических решений по турбомашинам.

Турбомшины используют в качестве главных двигателей автономных подводных и беспилотных летательных аппаратов, приводных двигателей генераторов, агрегатов насосных, компрессорных и наддува дизелей, в турбодетандерах, в качестве привода, ручного пневмоинструмента, системах катодной защиты и т.п. Одной из основных задач, которые необходимо решить при повышении частоты вращения ротора турбомашин, является обеспечение надежности опор (подшипников). При этом традиционно используемые технические решения оказываются неэффективными. Применяемые в настоящее время подшипники качения и жидкостные подшипники качения не выдерживают возрастающих нагрузок, ресурс и надежность опор резко снижается, значительно возрастают потери на трение.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является применение подшипников с газовой смазкой. Эта технология, оставаясь относительно мало распространенной, обладает рядом преимуществ. В условиях практически полного отсутствия трения ротор, опирающийся на подшипники с газовой смазкой, получает возможность значительного увеличения частоты вращения без ущерба для своих опор. При правильном проектировании колебания, генерируемые ротором, гасятся в газовом слое и, ослабленные, передаются на корпус агрегата. Появляется возможность отказаться от жидкостных систем смазки, которые загрязняют системы агрегата и окружающую среду. Снижается пожароопасность. Свойства газов слабо изменяются под действием радиации, что позволяет использовать турбомшины с газовыми подшипниками в атомной отрасли. Перечисленные достоинства газовой смазки делают турбомшины действительно машинами будущего, потенциал которых только начинает раскрываться в полной величине.

Благодаря сжимаемости газа колебания, генерируемые ротором, гасятся и передаются на опоры и корпус машины ослабленными, вследствие чего уменьшается ее виброактивность и значительно снижается виброшумовое воздействие техники на окружающую среду и человека. Поэтому санитарно-гигиенические характеристики роторных машин с газовыми опорами существенно лучше оборудования с традиционными подшипниками. Однако узлы трения с газовой смазкой имеют существенный недостаток, ограничивающий область их применения: износ рабочих поверхностей – следствие «сухого» трения, которое возникает при запуске или остановке машины, а также при случайных касаниях поверхностей узла трения во время работы.

В основном исследованиями в этой области занимаются зарубежные компании. Представленная в научно-технической литературе и других источниках информация о разрабатываемых этими компаниями технологиях носит ограниченный характер, не позволяющий использовать ее при проектировании. Инженерные методики расчета газовых опор должны учитывать свойства применяемого антифрикционного покрытия, давать возможность прогнозировать работу подшипника в режиме сухого трения с определенным покрытием и содержать рекомендации по применению антифрикционных покрытий. Представленная в общедоступных источниках информация позволяет сделать вывод, что в каждом конкретном случае разработка газовых опор для турбомашин является трудоемким, длительным и дорогостоящим процессом. Поэтому часто применение таких подшипников носит очень ограниченный, специфический характер обусловленный набором специальных требований не позволяющих использовать традиционные подшипники качения и скольжения и не оставляющие разработчикам вариантов для выбора.

Для устранения этого недостатка необходимо разработать технологию нанесения и подобрать материалы антифрикционных покрытий для рабочих поверхностей, свойства которых будут определять эффективность и надежность работы турбомшины в целом, что и составляет цель данной работы.

Материалы и методики

Materials and methods

Исследования износостойких покрытий для газовых подшипников проводятся в основном за рубежом [10, 15, 17–19], специалистами таких органи-

заций, как, например, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA, США) [10, 17], Северо-Восточный университет (г. Бостон) [14], компания Mohawk Innovative Technology [13–14, 19], Аргоннская национальная лаборатория [1, 3, 16, 18], Научно-исследовательская лаборатория армии США [10, 17] и Ренселерский политехнический институт. В нашей стране исследованиями в области защитных покрытий газовых подшипников в 1960–1970 гг. широко занимались ученые Государственного научно-исследовательского института машиноведения [6, 9].

Различные условия работы узлов трения обусловили создание множества различных технологий защитных покрытий для подшипников с газовой смазкой [3, 5, 10, 11, 14, 16–19]. К таким условиям относятся температурные режимы, скорость относительного движения рабочих поверхностей и нагруженность опоры, тип рабочей поверхности газовой опоры, на которую наносится покрытие (т.е. жесткая или податливая).

Кроме традиционных технологий, используемых для газовых подшипников, рассматривались и технологии, применяемые для нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности трибопар. Например, метод создания композиционных покрытий посредством плазменного электролитического оксидирования, разработанный в Институте химии ДВО РАН [5, 7, 11, 12] (здесь в качестве материала основы используются вентильные металлы – титан, алюминий), а также метод лазерной наплавки, разработанный в Центре лазерных технологий Института автоматики и процессов управления ДВО РАН [1, 3, 10, 16, 17] (материал основы – углеродистые стали). Именно эти методы мы выбрали для формирования защитных покрытий для рабочих поверхностей газовых подшипников. В качестве исследуемых материалов мы выбрали графит, пропитанный баббитом, руководствуясь опытом его использования [6, 9].

Методы исследований защитных покрытий газовых подшипников можно условно разделить на три группы. Первая – лабораторные эксперименты, проводимые на установках, которые измеряют какую-либо одну характеристику [19]: испытания на адгезионную прочность, определение шероховатости поверхности, исследование коэффициента трения. Вторая – эксперименты, проводимые на установках, имитирующих работу узлов трения [8, 14, 17, 19]. Это дает более полное понимание процесса трения исследуемой пары, т.к. в таких установках модели-

руется процессы, происходящие при взаимодействии рабочих поверхностей реальных опор в условиях, близких к эксплуатационным. Третья группа – натурные испытания на реальных машинах [2, 13, 18]. Это завершающий этап исследований, направленный на создание того или иного типа газовых опор.

Основные результаты

Main results

В данной работе выбран имитационный метод, соответственно, исследования проводятся на экспериментальной установке, имитирующей работу осевого газового подшипника в условиях сухого трения (рис. 1). Конструктивно установка представляет собой вертикальный вал 5 с закрепленным на нем подпятником 4. В нижней части установки расположен электродвигатель 1, на валу 2 которого закреплена пята 3. Изменение нагрузки осуществляется путем приращения массы 8, закрепленной в верхней части вала подпятника. Мы исследовали пару трения, состоящую из вращающейся пяты 3 и неподвижного подпятника 4. В ходе эксперимента измеряется момент трения, возникающий при контакте пяты и подпятника при различных режимных и конструктивных параметрах.

К режимным параметрам относятся относительная скорость рабочих поверхностей и нагрузка на опоры. К конструктивным – характеристики антифрикционных покрытий и геометрические параметры (наружный и внутренний диаметры подпятника). При контакте вращающейся пяты с подпятником последний стремится повернуть вал 5 с рычагом 6.

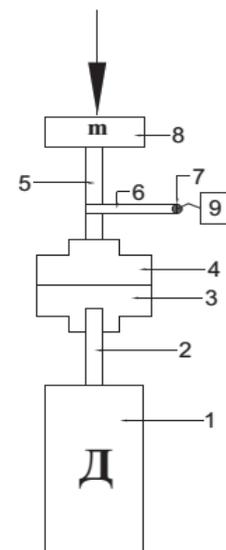


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель;
- 2 – вал двигателя;
- 3 – пята;
- 4 – подпятник;
- 5 – направляющий вал;
- 6 – рычаг;
- 7 – тензометрический датчик;
- 8 – груз;
- 9 – анализатор

Fig. 1. Schematic setup of experimental rig:

- 1 – motor;
- 2 – motor shaft;
- 3 – end journal;
- 4 – thrust bearing; 5 – guide shaft;
- 6 – lever;
- 7 – strain gage;
- 8 – weight;
- 9 – analyzer



Рис. 2. Экспериментальная установка по исследованию работы покрытий в режиме «сухого» трения

Fig. 2. Experimental rig for testing dry-friction coating

Поворачиваясь вокруг оси, рычаг воздействует свободным концом на тензометрический датчик 7, фиксирующий создаваемое усилие.

Сигнал с тензометра поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее в анализатор 9, в котором происходит обработка полученных результатов. Измерительная аппаратура с помощью оптического датчика фиксирует начало вращения пяты т.е. переход от трения покоя к трению скольжения (рис. 2–3).

При изучении пары трения хромированная сталь (Ст45, Хр15тв.) и бронза (О5Ц5С5) на стадии наладки и калибровки установки были получены зависимости изменения момента трения и частоты вращения от времени при постоянной нагрузке (рис. 3).

Разброс значений момента трения обусловлен высоким уровнем вибраций. Такие колебания являются следствием неточности механической обработки деталей и необходимостью притирки образцов к пяте, а также более точным позиционированием поверхностей пяты и подпятника. На данном этапе мы получили зависимости момента трения от различных режимных и конструктивных параметров.

В настоящее время производятся измерения крутящего момента, воспринимаемого тензомером, необходимого для страгивания пяты относительно подпятника (так называемый момент трогания), а также скорости вращения двигателя.

На стадии наладки эти недостатки устранены, и дальнейшие опыты, по нашему мнению, позволяют получить более достоверные данные процессов сухого трения в экспериментальных образцах. В дальнейшем, при многократном проведении эксперимента, мы получим зависимость момента трогания от

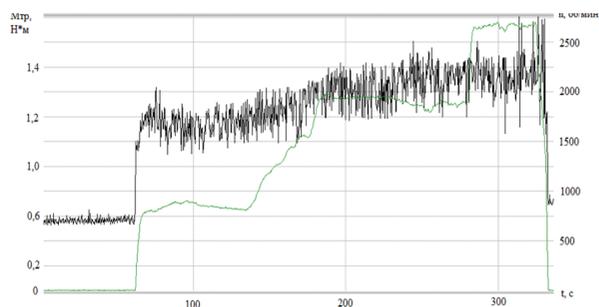


Рис. 3. Зависимость изменения момента трения от частоты вращения при постоянной нагрузке

Fig. 3. Friction moment versus rpm at constant load

количества запусков. Такая зависимость, по нашему мнению, будет характеризовать износостойкость исследуемого антифрикционного покрытия на одном из наиболее сложных режимов работы узлов трения.

Заключение

Conclusion

Итак, мы определили наиболее перспективные технологии нанесения и выбор материалов покрытия рабочих поверхностей подшипников с газовой смазкой. Выбран метод исследования защитных покрытий и материалов. Разработана и изготовлена экспериментальная установка.

Получены первые экспериментальные данные: зависимость изменения момента трения в исследуемой паре (бронза и хромированная сталь) от частоты вращения при постоянной нагрузке. Результаты данной работы могут повысить износостойкость и надежность узлов трения турбомашин.

Библиографический список

References

1. Андреев А.В., Коротаев А.Д., Литовченко И.Ю., Тюменцев А.Н., Борисов Д.П. Микроструктура и трибологические свойства нанокompозитных покрытий на основе аморфного углерода // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. Вып. 1. С. 73–83. [Andreev A.V., Korotaev A.D., Litovchenko I.Yu., Tyumentsev A.N., Borisov D.P. Microstructure and tribological properties of nono-composite coatings based on amorphous carbon. Physical mesomechanics. 2015. (1)18: 73–83. (In Russian)].
2. Бесчастных В.Н., Равикович Ю.А. Газовый подшипник тяжелого ротора газотурбинных двигателей. Опыт разработки и перспективы внедрения // Вестник МАИ.

2010. Т. 17. № 3. С. 91–98. [*Beschastnykh V.N., Ravikovich Yu.A.* Gas-lubricated bearing of heavy rotor in gas-turbine engines. *Vestnik MAI*. 2010; 3(17): 91–8. (In Russian)].
3. Браун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология: итоги и перспективы. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. [*Braun E.D., Buyanovskiy I.A., Voronin N.A.* et al. *Modern tribology: present state and future prospects*. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. (In Russian)].
 4. Васильев М.В. Фрикционное взаимодействие тел с твердосмазочными покрытиями в упругопластической области. Дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2013. [Электрон. ресурс] / Сайт тверского государственного технического университета. URL: <http://www.tstu.tver.ru> (дата обращения 18.01.2018) [*Vasiliev M.V.* Friction interaction of bodies with solid lubricant coating in elastic-plastic area. Candidate of Technical Sciences thesis. Tver: 2013 [electronic resources] / Website of Tver State Technical University URL: <http://www.tstu.tver.ru> (access date 18.01.2018). (In Russian)].
 5. Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Махталар Д.В., Егоркин В.С., Цветников А.К., Минаев А.Н. Композиционные полимерсодержащие защитные слои на титане // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 7. С. 37–42. [*Gnedekov S.V., Sinebrukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorokin V.S., Tsvetnikov A.K., Minaev A.N.* Composite polymer-content protective layers on titanium. *Corrosion: materials, protection*. 2007; 7: 37–42. (In Russian)].
 6. Пинегин С.В. Материалы опор с газовой смазкой. М., 1972. [*Pinegin S.V.* *Materials of gas bearings*. М.: 1972. (In Russian)].
 7. Руднев В.С., Яровая Т.П., Егоркин В.С., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Свойства покрытий, сформированных на титане плазменно-электролитическим окислением в фосфатно-боратном электролите // ЖПХ. 2010. Т. 83. Вып. 4. С. 611–617. [*Rudnev V.S., Yarovaya T.P., Egorokin V.S., Sinebrukhov S.L., Gnedekov S.V.* Properties of titanium coatings formed by plasma-electrolytic oxidation in phosphate borate electrolyte // *ZhPKh*. 2010; (4)83: 611–7. (In Russian)].
 8. Флек Б.М. Повышение трибологических характеристик подшипников скольжения сухого трения с тонкостенными двухслойными втулками. Дис. ... канд. техн. наук. Р. н/Д, 2006. [Электрон. ресурс] / Сайт ростовского государственного университета путей сообщения. URL: <http://www.rgups.ru>. (дата обращения: 10.01.2018). [*Flek B.M.* Improvement of tribological characteristics of dry running sliding bearings with thin-walled double-layer bushings. Candidate of Technical Sciences thesis. R. n/D, 2006. [electronic resources] / Website of Rostov Railway State University. URL: <http://www.rgups.ru>. (access date: 10.01.2018). (In Russian)].
 9. Фролов К.В. Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. [*Frolov K.V.* *Modern tribology: present state and future prospects*. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. (In Russian)].
 10. 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.
 11. *Gnedekov 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 Journal of Inorganic Chemistry*. 2015; 8 (60): 975–86.
 12. *Gnedekov 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; 7 (46): 823–7.
 13. *Heshmat H., Jahanmir S., Walton J.* Coatings for high temperature foil bearings // *Proceedings of the ASME Turbo Expo. Power for Land, Sea & Air*. ASME Paper GT2007-27975. 2007; 5: 971–6.
 14. *Heshmat H., Hryniewicz P., Walton J., DellaCorte C.* Low-friction wear-resistant coatings for high-temperature foil bearings // *Tribology International*. 2006; 11–12(38): 1059–75.
 15. *Jacob S.* Application of tribology in foil bearing technology. Northeastern Univ., 2011. URL: http://www1.coe.neu.edu/~smuftu/docs/2011/ME5656_Term_Project_Foil_Bearing_Technology.pdf – 10.01.2018.
 16. *Jahanmir S., Heshmat H., Heshmat C., Eryilmaz O., Erdemir A.* Evaluation of DLC coatings for foil bearing applications // *Proceedings of International Joint Tribology Conference*. Paper No. IJTC20076-44035. ASME, New York, 2007: 5–7.
 17. *Radil K., DellaCorte C.* The Performance of PS400 subjected to sliding contact at temperatures from 260 to 927°C // *Tribology Transactions*. 2017; 6(60): 957–64.
 18. *Ajayi O., Woodford J., Erdemir A., 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.
 19. *Jahanmir S., Heshmat H., Heshmat C.* Assessment of tribological coatings for foil bearing. Mohawk Innovative Technology Inc – *Tribology Transactions*. 2009; 2(52): 231–42.

Сведения об авторах

Портнова Олеся Сергеевна, ассистент кафедры Судовой энергетики и автоматики Инженерной школы, Дальнево-



сточного федерального университета. Адрес: 690091, Россия, Владивосток, ул. Адмирала Фокина, д. 26. Телефон: +7 (924) 123-91-06; E-mail: olesya.portnova@mail.ru.

Грибиниченко Матвей Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры Судовой энергетики и автоматики Инженерной школы, Дальневосточного федерального университета. Адрес: 690091, Россия, Владивосток, ул. Адмирала Фокина, д. 26. Телефон: +7 (423) 226-13-31, 8 (800) 555-08-88; E-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru.

About the authors

Portnova O., Teaching Assistant, Chair of Ship Powering and Automatics, Engineering School, Far Eastern Federal University. Address: Ul. Admirala Fokina 26, Vladivostok, 690091, Russia. Tel.: +7 (924) 123-91-06; E-mail: olesya.portnova@mail.ru.

Gribinichenko M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Chair of Ship Powering and Automatics, Engineering School, Far Eastern Federal University. Address: Ul. Admirala Fokina 26, Vladivostok, 690091, Russia. Tel.: +7 (423) 226-13-31, 8 (800) 555-08-88; E-mail: gribinichenko.mv@dvfu.ru.

Поступила / Received: 14.03.18

Принята в печать / Accepted: 18.04.18

© Портнова О.С., Грибиниченко М.В., 2018