УДК 621.822

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДШИПНИКОВ

СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

**Новиков А.Н., Родичев А.Ю., Токмакова М.А.**

*Россия, г. Орёл, ОГУ имени И.С. Тургенева*

В статье представлено исследование адгезионной прочности сцепления пленочных антифрикционных покрытий, наносимых на многослойные подшипники скольжения роторных агрегатов. Представлен процесс формирования пленочного антифрикционного покрытия. Рассмотрен эксперимент по определению прочности сцепления пленочного антифрикционного покрытия. В процессе проведения эксперимента использовался ряд образцов различной шероховатости, на которые наносилось пленочное антифрикционное покрытие. Проводилась качественная оценка прочности сцепления покрытия с основным антифрикционным слоем. Сформулированы выводы о прочности сцепления пленочного антифрикционного покрытия в зависимости от шероховатости поверхности и начальной обработке основного антифрикционного слоя.

**Ключевые слова:** подшипник скольжения, энергоэффективность, пленочное покрытие, прочность, адгезия, антифрикционное покрытие.

Роторные агрегаты, обеспечивающие функционирование оборудования, работают в сложных условиях, характеризующихся наличием твердых частиц в рабочей среде [1,2]. Твердые частицы уменьшают срок службы подшипников, а так же способствуют увеличению расхода энергии вследствие ее диссипации.

Актуальной задачей повышения эксплуатационных характеристик роторных машин обеспечивающих работу оборудования является повышение эксплуатационных характеристик антифрикционной пары цапфа – втулка подшипника скольжения. При эксплуатации нефтегазового оборудования используют несколько видов подшипники скольжения. Одним из них являются подшипники скольжения на основе карбида кремния или оксидов, обладают как высокой износостойкостью, так и хрупкостью, что приводит к образованию трещин. Другой вид используемых подшипников скольжения представляют биметаллические подшипники скольжения (стальное основание с наплавленным антифрикционным слоем). Достоинством таких подшипников является невысокая стоимость, а недостатком сложность технологии нанесения антифрикционного покрытия (в частности различных видов баббитов) и как следствие повышенный износ вследствие неоднородности антифрикционного слоя. Третьим и наиболее подходящим видом для этого является многослойный подшипник с износостойким покрытием [3].

Пары трения, в частности их трибологические характеристики получили возможность своего улучшения благодаря применению различных тонкопленочных покрытий. Применение тонких тонколеночных антифрикционных покрытий является наиболее перспективным способом уменьшения износа различных механизмов. В состав современных пленочных антифрикционных покрытий входят высокодисперсные частицы твердых смазочных веществ, красящий пигмент, связующие элементы, растворители и ряд дополнительных элементов [4]. В роли пигментов в пленочном покрытии выступает в большинстве случаев графит, дисульфид молибдена и наночастицы. Выбор рационального соотношения компонентов является одной из главных задач. Решение этой задачи позволит существенно повысить возможности использования пленочных антифрикционных покрытий в промышленных механизмах [5,6]. Этапы формирования пленочного антифрикционного покрытия представляют собой последовательно происходящие процедуры, такие как:

- предварительная обработка поверхности, в результате которой производиться очистка от загрязнений и наносится требуемая шероховатость поверхности, что обеспечивает повышение прочности адгезии наносимого покрытия с основой;

- нанесение промежуточного слоя, который способствует выравниванию поверхности;

- увеличение слоя антифрикционного покрытия за счет нанесения последующих слоев.

В соответствии с разработанными программой и методикой проведения испытаний пленочных антифрикционных покрытий было подготовлено три образца, которые являются упорными подшипниками скольжения (рисунок 2). В качестве предварительной обработки, для создания требуемой шероховатости поверхностного антифрикционного слоя поверхности применялись: фрезерование, пескоструйная обработка, шлифование. В результате были получены различные параметры шероховатости поверхности.



***Рисунок 1 ‑ Экспериментальный образец с нанесенным пленочным антифрикционным***

***покрытием и решетчатыми надрезами***

Качественная оценка адгезии нанесенного пленочного антифрикционного покрытия проводилась используя метод решетчатого надреза ГОСТ Р 54563-2011. Подготавливались специальные трафареты, для нанесения надрезов. По ним режущим инструментом, параметры которого характеризуются углом заточки режущей часть 200, шириной лезвия 0,43±0,03 мм, производились решетчатые надрезы пленочного антифрикционного покрытия (рисунок 1). Мягкой кистью проводилась очистка экспериментальных образцов по двум диагоналям решетки.

Изменение микрогеометрии поверхности экспериментальных образцов по итогам нанесения пленочного антифрикционного покрытия контролировалось профилометром марки 171621. В результате наблюдалось следующее, среднее значение шероховатости поверхности после нанесения пленочного антифрикционного покрытия на экспериментальные образцы подготовленные шлифованием составила Ra 1,4мкм; подготовленные пескоструйной обработкой составила Ra 0,72 мкм; подготовленные фрезерованием Ra 2,5мкм (рисунок 2).

Проверку прочности сцепления пленочного антифрикционного покрытия с поверхностью основы экспериментального образца осуществляли с применением липкой ленты. Перед испытаниями удалили два полных витка липкой ленты, исключив тем самым вероятность высыхания поверхностного рабочего слоя.

Качественная оценка адгезии пленочного антифрикционного покрытия с основой изделия производилась по внешнему виду (рисунок 2). Поверхность надрезов оценивалась под лупой десятикратного увеличения, при этом освещение подавалось под разными углами. Липкая лента требуемой длинны располагалась параллельно какому ни будь направлению надреза. Производилось плотное прижатие липкой ленты к поверхности экспериментального образца. При этом индикатором плотности прижатия выступал цвет покрытия, просматриваемый через липкую ленту. Выдержка экспериментальных образцов с липкой лентой проводилась в течение 5 минут. Отрыв липкой ленты осуществлялся за свободный конец плавно в течение одной секунды под углом приближенным к 60°. Контроль величины усилий отрыва липкой ленты от поверхности экспериментального образца производился специальным динамометром.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| IMG_20200112_105654 | IMG_20200112_105620 | IMG_20200112_105633 |
| Ra 2,5мкм | Ra 1,4мкм | Ra 0,72 мкм |

***Рисунок 2 ‑ Качественная оценка адгезии пленочного антифрикционного***

***покрытия с основой изделия после испытаний***

Количественную оценку результатов испытаний проводили на трех экспериментальных образцах в шести областях поверхности на каждом. В ходе анализа данных полученных экспериментально было установлено, что результаты во всех шести областях на каждом образце совпадают или их отличие не превышает одного балла согласно шкале оценок ГОСТ Р 54563-2011 [7].

В нашем случае в используемых образцах с многослойным покрытием наблюдалось расслоение между двумя верхними слоями покрытия, т.е. между пленочным антифрикционным покрытием и основным антифрикционным слоем нанесенным с помочью газопламенного напыления.

Максимальное значение отслоения пленочного антифрикционного покрытия составило 27%. Разделение покрытия между слоями не наблюдалось. Минимальное отслоения пленочного антифрикционного покрытия составило 4%.

Основываясь на результатах проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- микрогеометрия поверхности изменяется при нанесении пленочного антифрикционного покрытия;

- параметры шероховатости получаемой после нанесения пленочного покрытия уменьшаются, что способствует снижению коэффициента трения;

- адгезия пленочного антифрикционного покрытия существенно зависит от метода подготовки поверхности;

- по итогам исследований наиболее рациональным методом подготовки поверхности основного антифрикционного слоя является чистовое фрезерование

Список литературы

1. Florian Summer, Florian Grün, Martin Offenbecher, Stuart Taylor, [Challenges of friction reduction of engine plain bearings // Tackling the problem with novel bearing materials](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X18305310)[Tribology International](https://www.sciencedirect.com/science/journal/0301679X), Volume 131, March 2019, P. 238-250.

2. Savin, L.A., Kornaev, A.V., Kornaeva, E.P., Influence of critical flow rates on characteristics of enforced and shear flows in circular convergent-divergent channels // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – 8761375.

3. Пат. 2708410 Российская Федерация, МПК F16C 33/04, В23Р 6/00. Способ изготовления подшипника скольжения. / Родичев А.Ю., Поляков Р. Н., Савин Л.А., Горин А.В. Токмакова М.А.; ОГУ им. И.С.Тургенева; № 2018146970; заявл. 26.12.2018; опубл. 06.12.2019, Бюл. № 34 - 5 с.:1ил.

4. Jianbo Zhao, Yong Wang, Bin Han, Meiyan Li, Gang Cui [*Antifriction effects of Cu2S film on Ni-based MMC coating*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217302293)*.* [Surface and Coatings Technology](https://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972), Volume **315**, 15 April 2017, Pages 391-398.

5. Yan Hao, Xiying Zhou, Jiajia Shao, Yukun Zhu [*The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897219301288)*.* [Surface and Coatings Technology](https://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972), Volume **362**, 25 March 2019, Pages 213-219.

6. ГОСТ Р 54563-2011 Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза (ИСО 2409:2007).

7. ГОСТ Р 51694-2000 Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия (ИСО 2808:1997 "Краски и лаки. Определение толщины пленки", MOD).

**Новиков Александр Николаевич**, профессор кафедры сервиса и ремонта машин ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: srmostu@mail.ru

**Родичев Алексей Юрьевич**, доцент кафедры сервиса и ремонта мешин ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: rodfox@yandex.ru

**Токмакова Мария Андреевна**, аспирант ОГУ имени И.С. Тургенева, E-mail: gorin57@mail.ru

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**INCREASED BEARING ENERGY EFFICIENCY SLIDING ROTARY UNITS**

**BY APPLYING FILM COATINGS**

**Novikov A.N., Rodichev A.Y. Tokmakova M.A.**

*Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev*

The article presents a study of the adhesive strength of the adhesion of film antifriction coatings applied to multilayer plain bearings of rotor units. The process of forming a film antifriction coating is presented. An experiment to determine the adhesion strength of an antifriction film coating is considered. In the course of the experiment, a number of samples of various roughness were used, on which an antifriction film coating was applied. A qualitative assessment of the adhesion strength of the coating with the main antifriction layer was carried out. Conclusions are formulated about the adhesion strength of the film antifriction coating depending on the surface roughness and the initial processing of the main antifriction layer.

**Keywords:** sleeve bearing, energy efficiency, film coating, strength, adhesion, anti-friction coating.

Bibliography

1. Florian Summer, Florian Grün, Martin Offenbecher, Stuart Taylor, [Challenges of friction reduction of engine plain bearings // Tackling the problem with novel bearing materials](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X18305310)[Tribology International](https://www.sciencedirect.com/science/journal/0301679X), Volume 131, March 2019, P. 238-250.

2. Savin, L.A., Kornaev, A.V., Kornaeva, E.P., Influence of critical flow rates on characteristics of enforced and shear flows in circular convergent-divergent channels // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – 8761375.

3. Pat. 2708410 Russian Federation, IPC F16C 33/04, В23Р 6/00. A method of manufacturing a plain bearing. / Rodichev A.Yu., Polyakov R.N., Savin L.A., Gorin A.V. Tokmakova M.A .; OSU them. I.S. Turgenev; No. 2018146970; declared 12/26/2018; publ. 06.12.2019, Bul. No. 34 - 5 pp.: 1ill.

4. Jianbo Zhao, Yong Wang, Bin Han, Meiyan Li, Gang Cui [*Antifriction effects of Cu2S film on Ni-based MMC coating*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217302293)*.* [Surface and Coatings Technology](https://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972), Volume **315**, 15 April 2017, Pages 391-398.

5. Yan Hao, Xiying Zhou, Jiajia Shao, Yukun Zhu [*The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897219301288)*.* [Surface and Coatings Technology](https://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972), Volume **362**, 25 March 2019, Pages 213-219.

6. GOST R 54563-2011 Paints and varnishes. Determination of adhesion by the cross-cut method (ISO 2409: 2007).

7. GOST R 51694-2000 Paints and varnishes. Determination of coating thickness (ISO 2808: 1997 Paints and varnishes - Determination of film thickness, MOD).

**Novikov Alexandr Nikolaevich**, professor of the department “Mechatronics, Mechanics and Robotics”, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: srmostu@mail.ru

**Rodichev Aleksei Yrievich**, associate professor of the department “Mechatronics, Mechanics and Robotics”, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: rodfox@yandex.ru

**Tokmakova Maria Andreevna**, graduate student, Orel State University named after I.S. Turgenev, E-mail: gorin57@mail.ru