

УДК 62-762.001

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА ЗА СЧЁТ МОДИФИКАЦИИ ГРАФИТОМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ШАРНИРНЫХ ПОДШИПНИКОВ

© 2024 В.Б. Балякин¹, А.А. Филиппов², Д.Е.¹ Долгих

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва, г. Самара, Россия

² Вологодский завод специальных подшипников, г. Вологда, Россия

Статья поступила в редакцию 28.05.2024

В настоящей статье показана возможность улучшения триботехнических характеристик антифрикционного покрытия на основе серебра за счёт модификации графитом для использования в шарнирных подшипниках. Приводится методика определения коэффициентов трения и интенсивности изнашивания антифрикционного материала на основе серебра. Показаны результаты сравнения коэффициентов трения в паре трения сталь ШХ-15 и антифрикционный материал на основе чистого серебра и с добавлением в расплав 6% графита. Было выявлено, что при легировании серебряного покрытия графитом коэффициент трения снижается на 43...48%. Для пары трения антифрикционного материала, содержащего 94% серебра и 6% графита и стали ШХ-15 коэффициент интенсивности изнашивания антифрикционной поверхности при контактном напряжении 330 МПа равен $I = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{м}$, а для контр тела в виде стального шара $I_{\text{ш}} = 4,46 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{м}$. Так как интенсивность изнашивания шара на два порядка ниже интенсивности изнашивания антифрикционного материала износ шара можно не учитывать в расчётах на ресурс шарнирного подшипника. Получена зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от максимальных контактных напряжений, что позволит разработать методику расчёта шарнирных подшипников на долговечность.

Ключевые слова: образец, антифрикционное покрытие, серебро, графит, трибометр TRB, профилометр, шероховатость, интенсивность изнашивания, шарнирные подшипники, долговечность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-26-34

EDN: DDCQVD

ВВЕДЕНИЕ

Шарнирные сферические подшипники (рисунк1) широко используются в опорах механизмов систем управления и шасси самолётов, рулевых агрегатов ракетносителей и двигателей коррекции космических летательных аппаратов [1,2].

При этом они работают при качательном движении с небольшими скоростями и часто при отсутствии смазки. Для снижения трения на сферическую поверхность наружного кольца наносится слой антифрикционного материала (металлофторопласт, препрег, бронза, серебро и т.д.). Это позволяет снизить коэффициент трения в зоне контакта и момент сопротивления при вращении. Критериями работоспособности и долговечности шарнирного подшипника является прочность и износостойкость. В зарубежной и отечественной литературе [3,4] приводятся методы расчёта шарнирных подшипников по изнашиванию и используются зависимости,

Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой основ конструирования машин. E-mail: vaticheev@rambler.ru

Филиппов Александр Александрович, заместитель Генерального директора.

Долгих Дмитрий Евгеньевич, аспирант.



Рисунок 1 - Общий вид сферического шарнирного подшипника

аналогичные зависимостям расчёта долговечности подшипников скольжения. Для определения долговечности шарнирных подшипников необходимо знать коэффициенты трения и интенсивности изнашивания антифрикционного материала в зависимости от контактного давления [5,6,7,8]. В настоящее время для обеспечения больших контактных давлений, например, в шарнирных подшипниках стоек шасси самолёта

в качестве антифрикционного материала используется покрытие японской фирмы из высокопрочных материалов ELGOGLIDE и KAMATICS [3]. В связи с необходимостью импортозамещения была поставлена задача разработать и внедрить отечественный антифрикционный материал высокой прочности. Антифрикционные материалы на основе металлофторопласта и препрега имеют невысокую прочность. Для повышения прочности и износостойкости фторопласта Ф4PM20 используют способ радиационной модификации. Однако даже в этом случае максимальные контактные напряжения сжатия, которые выдерживают эти материалы не превышают 50 МПа [9].

Для снижения коэффициента трения и интенсивности изнашивания производят модификацию антифрикционного покрытия различными методами [10,11,12]. Так в работе [10] предлагается повышать износостойкость бронзовых вкладышей нанесения молибденового покрытия ионно-плазменным способом. Однако ионно-плазменное напыление на внутреннюю поверхность шарнирного подшипника малого диаметра выполнить технически не представляется возможным. Хорошую прочность рабочей поверхности сепараторов подшипников качества обеспечивает нанесение покрытия из серебра. Однако в чистом виде серебро обладает достаточно высоким коэффициентом трения. Для снижения коэффициента трения предлагается модифицировать антифрикционное покрытие за счёт внедрения в состав серебра графита путём электролиза. В процессе осаждения антифрикционного покрытия путём электролиза в растворе смешиваются молекулы серебра и графита. Максимальное количество графита при модификации серебра без охрупчивания материала составляет 6%.

Цель исследования – Оценить возможность использования антифрикционного покрытия ВТРН.49.040.01.002, содержащего 94 % серебра и 6% наполнителя в виде графита для повышения долговечности шарнирных подшипников.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Прочностные характеристики антифрикционного материала на основе серебра с добавлением графита ВТРН.49.040.01.002 проводились на предприятии ОАО «Вологодский завод специальных подшипников». Образец из стали ШХ-15 с нанесённым антифрикционным покрытием толщиной 100 мкм нагружался на прессе до напряжений сжатия 900 МПа при этом деформация антифрикционного слоя была менее 1мкм. Ударные испытания проводились на ударном стенде ВСТС-750/1000 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Ударный стенд ВСТС750/1000

Триботехнические характеристики материала ВТРН.49.040.01.002 проводились в Самарском университете на автоматизированной машине трения Tribometer TRB по схеме шар-диск (см. рис. 3), которая позволяет провести испытания в условиях, максимально приближенные к реальным условиям испытываемого контакта трения при работе подшипника, такие как материалы, находящиеся в контакте, скорость скольжения, смазка, контактное напряжение, температура.

Во время испытаний определяется коэффициент трения путем измерения прогиба упругого элемента.

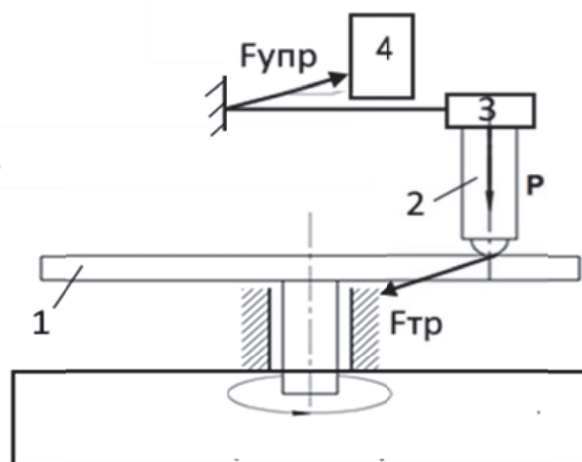


Рисунок 3 – Схема установки Tribometer TRB:
1 – образец-диск; 2 – держатель с шаром;
3 – груз; 4 – блок управления

Таблица 1 - Технические характеристики прибора Tribometer TRB

Диапазон нагрузки	до 60 Н
Разрешение по нагрузке	30 мН
Макс. сила трения	10 Н
Разрешение по силе трения	5 мН
Скорость вращения мотора	0,3 - 600 об/мин
Максимальная линейная скорость	1,2 м/с
Максимальный радиус следа	50 мм
Максимальный крутящий момент	450 мН.м

гого рычага трибометра. Коэффициенты износа материалов шара и диска рассчитываются исходя из потерь объема материала в процессе испытаний. Технические параметры трибометра приведены в таблице 1.

В качестве материала шара и колец при испытаниях использовалась сталь ШХ-15. Испытанию подверглись кольца с покрытием из чистого серебра и антифрикционного материала на основе серебра, содержащие 94% серебра и 6% графита. Коэффициент трения измерялся 200 раз в секунду, затем программный комплекс трибометра определял минимальное, максимальное и среднее значение коэффициента трения на этом временном интервале. При этом определялось среднеквадратичное отклонение с вероятностью 0,99.

Всего испытывалось четыре образца с покрытием этого типа.

Величина контактных напряжений обеспечивалась подбором тарированных грузов. На рисунке 4 показаны расчётные максимальные контактные напряжения 330 МПа, которые обеспечивал груз в 1Н.

Исследования при износе антифрикционного материала проводились при пяти вариантах максимальных контактных напряжений: 330 МПа, 520 МПа, 630МПа, 790МПа и 940МПа.

Шар из стали ШХ-15 диаметром 9,525 мм устанавливался в держатель и со скоростью 0,9 м/с скользил по кольцу. В качестве смазки использовался мелкодисперсный графит нанесённый на поверхность покрытия из антифрикционного материала.

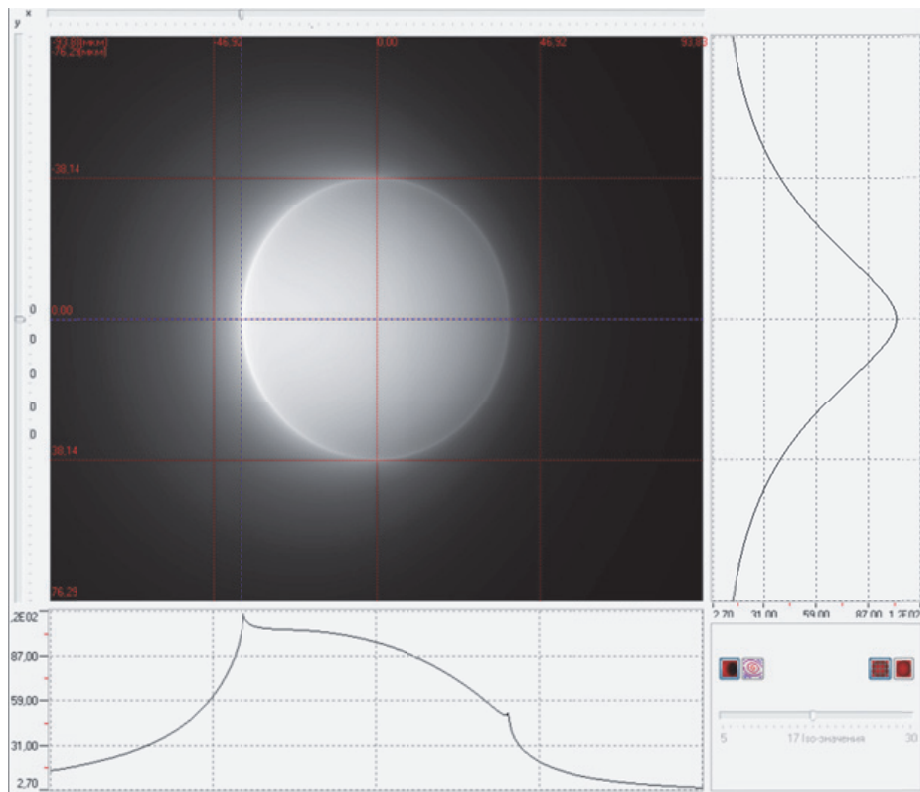


Рисунок 4 — Распределение давления и пятно контакта шар — образец при нагрузке 1Н

Для определения коэффициента трения длительность испытаний устанавливалась в виде длины пути $S=1200$ м и $S=3000$ м, что соответствует перемещениям в подшипнике. Для обеспечения заметного износа в паре трения путь удлиняли до 100000 м.

После испытаний профиль поверхности кольца измеряется с помощью профилометра SURTRONIC 25 для определения глубины следа на кольце (рисунок 5). Профилометр устанавливается на экспериментальном столе, как показано на рисунке 5,а, и в шестнадцати, равномерно расположенных по окружности сечениях измеряется профиль микронеровностей поверхности кольца в радиальном направлении (рисунок 5,б).

Объем изношенного материала рассчитывается автоматически программным обеспечением трибометра и определяется величина коэффициента интенсивности износа поверхности I с размерностью $\text{мм}^3/\text{м}$. Среднее значение шестнадцати измерений принимается за истинное значение коэффициента интенсивности износа антифрикционного материала. Износ контртела (шара) определялся вычислением объема по диаметру следа износа. Диаметр пятна износа измерялся на инструментальном микроскопе. При известном диаметре следа износа можно определить объем изношенного сегмента с шара по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} V_c &= \pi \int_{R-h}^R (R^2 - x^2) dx = \\ &= \pi(R^2x - x^3/3)R/(R - h) = \\ &= \pi h^2(R - h/3), \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$, где R – радиус шарика, r – радиус пятна износа.

Поделив объем изношенного материала, полученному по формуле (1), на длину пути вычисляем коэффициент интенсивности изнаши-

вания материала, соответствующего определенному контактному напряжению

$$I = V_c/S [\text{мм}^3/\text{м}]. \quad (2).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ

По результатам проведенной серии ударных испытаний образцы с антифрикционным материалом ВТРН.49.040.01.002 на основе серебра с добавлением 6% графита выдержали ударную нагрузку от 20г до 175г без повреждения и деформации поверхности покрытия.

Для оценки повышения качества поверхности антифрикционного материала сначала проводились испытание образца с покрытием чистым серебром. Результаты испытания приведены на рисунке 6. Показано изменение коэффициента трения при пробеге 1200 м. Из графика видно, что среднее значение коэффициента трения составило 0,29 при среднеквадратичном отклонении 0,007.

Для сравнения было проведено испытание образца с напылением на рабочую поверхность антифрикционного материала ВТРН.49.040.01.002. Из графика 7 видно, что среднее значение коэффициента трения составило 0,157 и среднеквадратичное отклонение 0,004. Причём с увеличением пробега коэффициент трения растёт.

Для более глубокого изучения процесса изменения коэффициента трения время испытаний было увеличено до величины пробега 3000 м. На рисунке 8 показано изменение коэффициента трения при пробеге 3000 м.

Из графика видно, что коэффициент трения начал снижаться и среднее значение коэффициента трения составило 0,155 при среднеквадратичном отклонении 0,004. Таким образом коэффициент трения снизился по сравнению с первым экспериментом на 0,02.

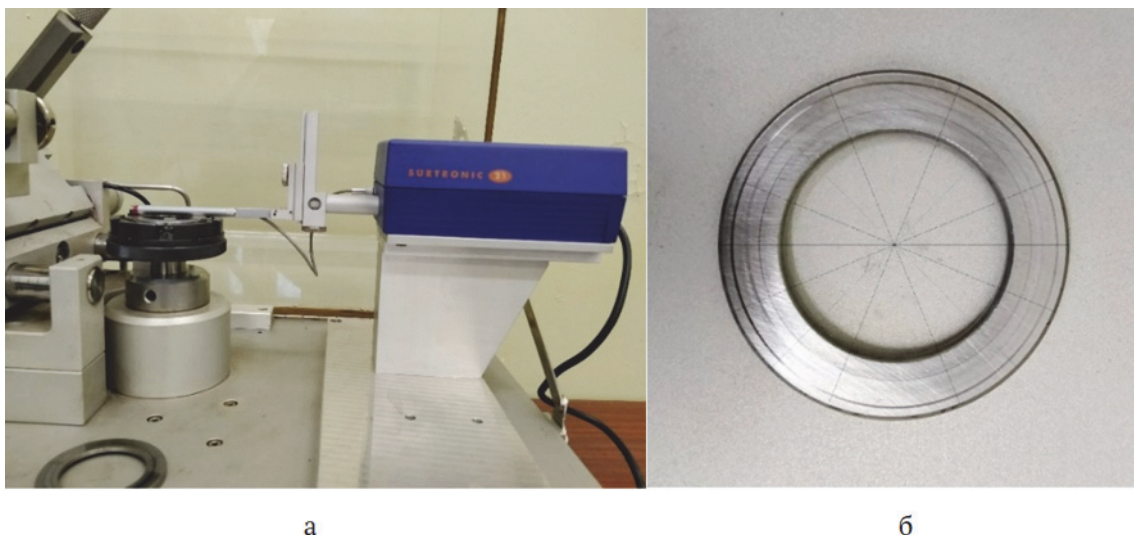


Рисунок 5 — Схема измерения износа образца

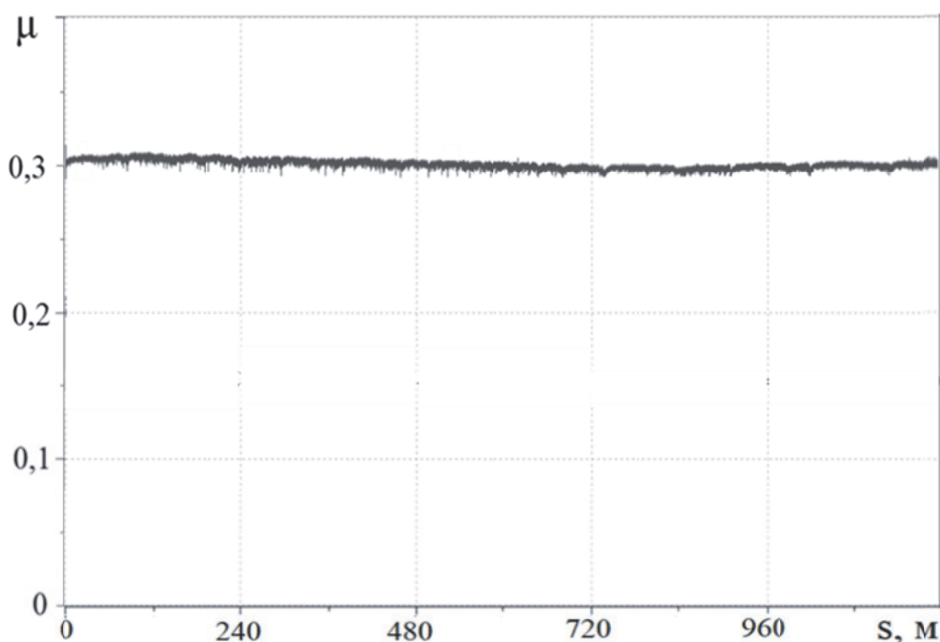


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения в паре шар из стали ШХ-15 и кольцо с покрытием из серебра при пробеге 1200 м

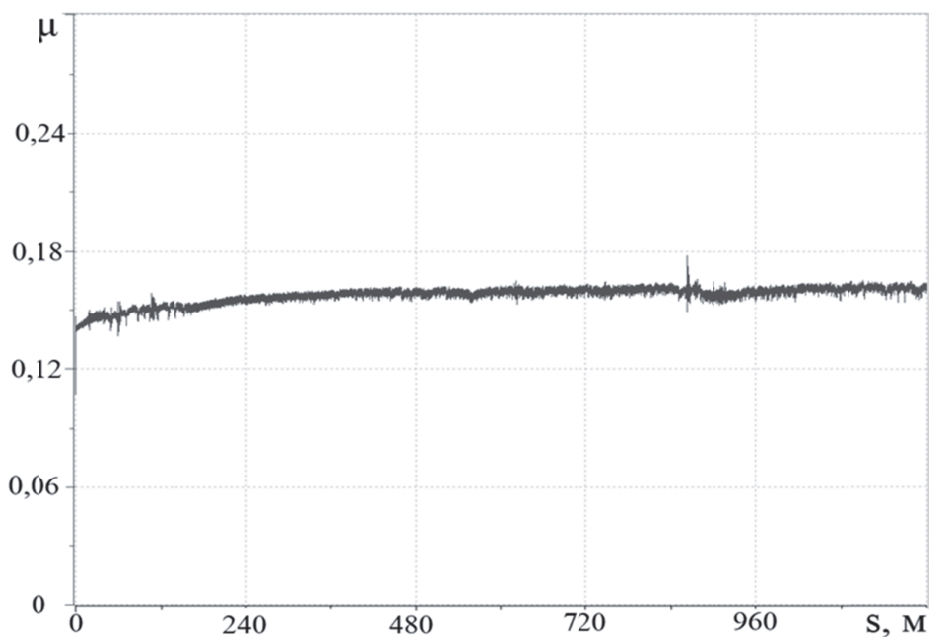


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения в паре шар из стали ШХ-15 и кольцо с покрытием 94% серебра и 6% графита на пробеге 1200 м

Из сравнения графиков видно, что при легировании серебряного покрытия графитом коэффициент трения антифрикционного материала снижается в среднем на 43...48 %.

Для определения интенсивности износа проводилось сравнение профиля микронеровностей до начала эксперимента и со следами износа после пробега шара 100000 м. Результаты сравнения приведены на рисунке 9.

На рисунке 9 выделены области где был установлен индентор в виде шара и происходил процесс износа во время эксперимента. Начало

замера профиля устанавливалось с помощью линейки с ценой деления 1 мм, что даёт точность измерения 0,3 мм. В связи с этим ширина возможной области износа выбиралась величиной 0,6 мм. Точность базирования профилометра в окружном направлении составляла 0,1мм. Этим объясняется некоторое несовпадение вида профилограммы в области где износ отсутствовал.

Из графиков на рисунке 9 видно, что в области износа величина шероховатости уменьшилась на 1,5 мкм. Это говорит о хорошей износостойкости антифрикционного материала с 94%

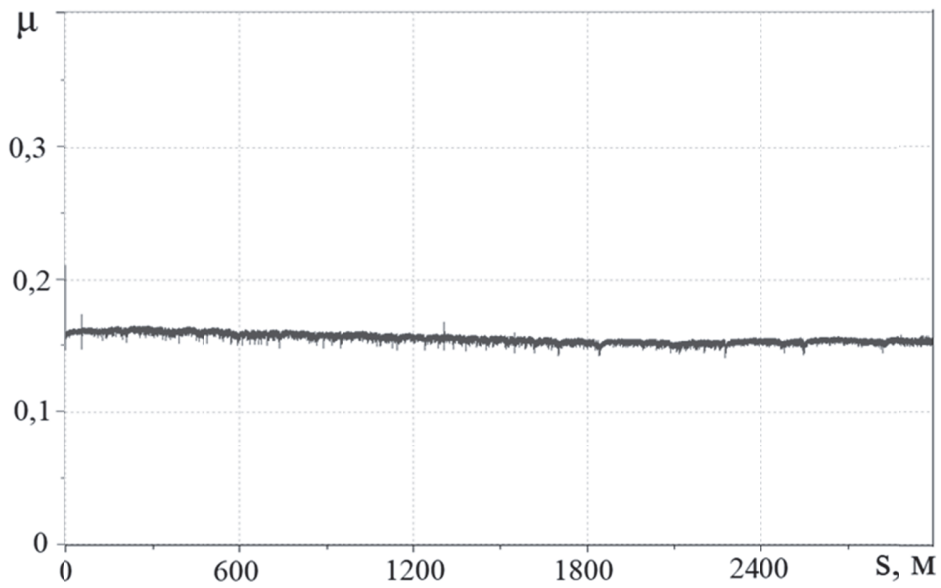
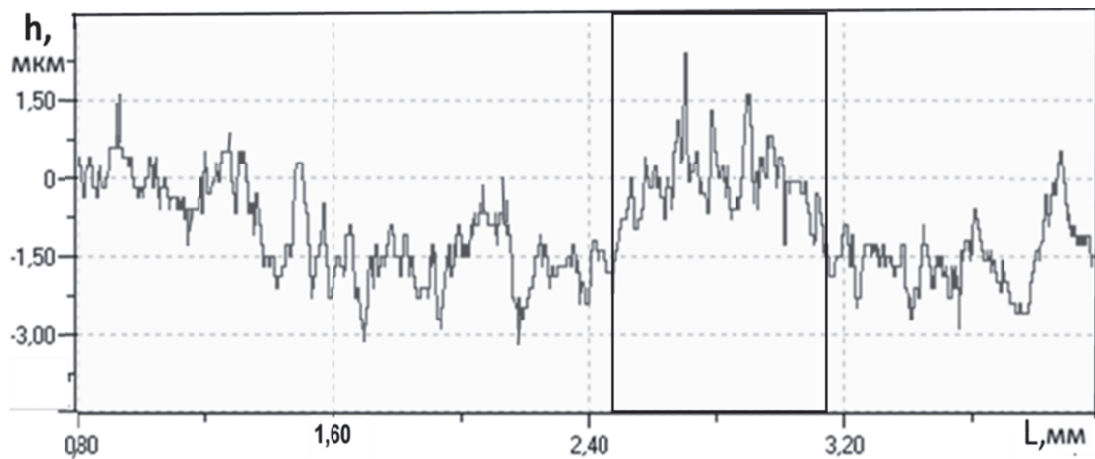
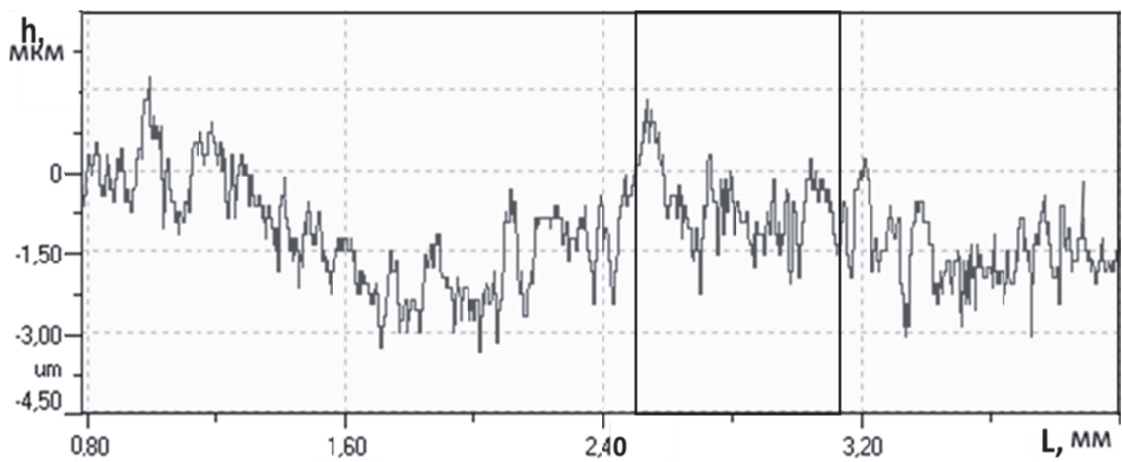


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения в паре шар из стали ШХ-15 и кольцо с покрытием 94% серебра и 6% графита при пробеге 3000м



а)



б)

Рисунок 9 – Профиль поверхности кольца в паре шар из стали ШХ-15 и кольцо с покрытием 94% серебра и 6% графита:
а) до начала эксперимента; б) со следами износа после пробега 100000 м

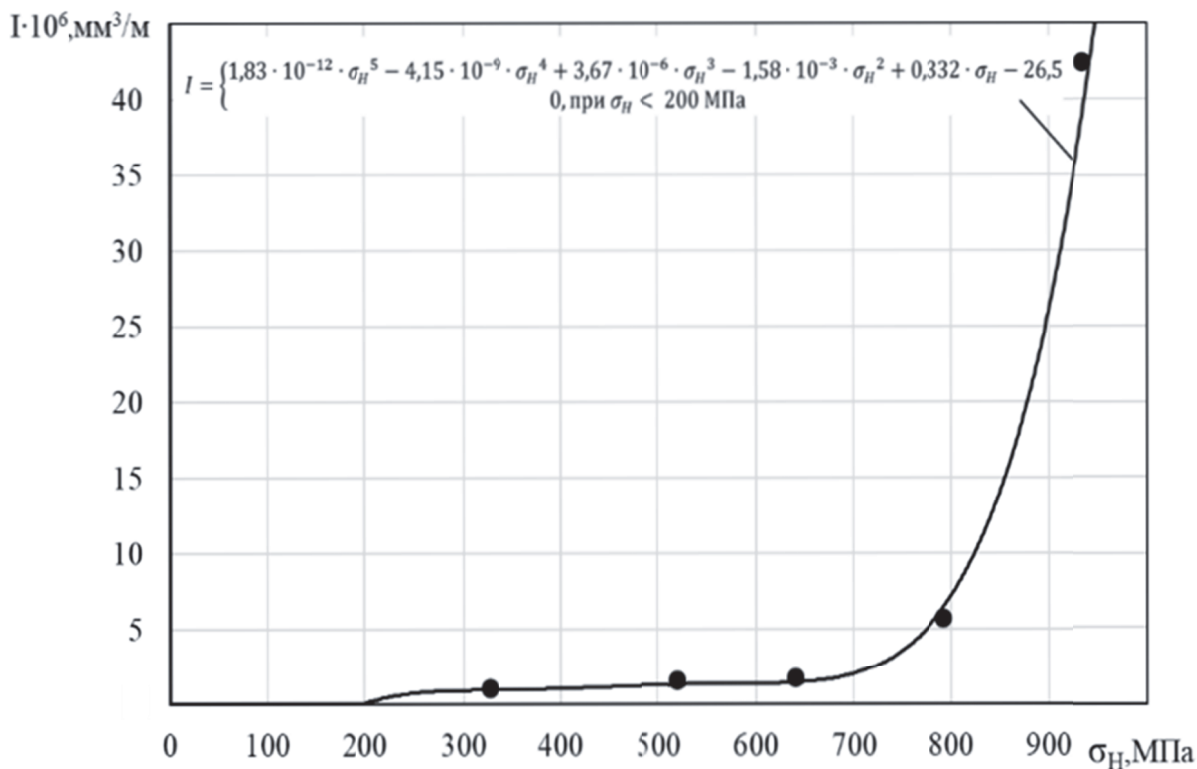


Рисунок 10 - Зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от максимальных контактных давлений

серебра и 6% графита. Для этой пары трения коэффициент интенсивности изнашивания антифрикционной поверхности при контактном напряжении 330 МПа равен $I = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{м}$.

Для получения более точной картины изнашивания, когда износ будет больше шероховатости (см. рис. 6), проводились эксперименты при более высоких контактных давлениях.

Дополнительно испытания на износ проводились при контактных давлениях 520 МПа, 630 МПа, 790 МПа и 940 МПа. Эти испытания позволили построить зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от максимальных контактных давлений, которая показана на рисунке 10.

Кривая зависимости коэффициента изнашивания от максимальных контактных давлений была аппроксимирована уравнением в виде

$$I = \begin{cases} 1,83 \cdot 10^{-12} \cdot \sigma_H^5 - 4,15 \cdot 10^{-9} \cdot \sigma_H^4 + 3,67 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_H^3 - 1,58 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_H^2 + 0,332 \cdot \sigma_H - 26,5 \\ 0, \text{ при } \sigma_H < 200 \text{ МПа} \end{cases}$$

с погрешностью не превышающей 10%.

Интенсивность изнашивания антифрикционного материала при максимальных контактных напряжениях меньше 200 МПа выявить не удалось даже при пробеге 100000 м. Для шарнирных подшипников больше пробегов не бывает, поэтому аппроксимацию зависимости коэффициента изнашивания от максимального контактного давления ограничили на участке от 200 МПа.

В процессе работы при относительном движении изнашивается не только антифрикционное покрытие, но и контр тело в виде шара. Вид изношенной поверхности шара при контактном напряжении 330 МПа показан на рисунке 11.

Измерив диаметр окружности поверхности износа можно по зависимостям (1) и (2) рассчитать коэффициент интенсивности изнашивания.

Для пары трения антифрикционного материала, содержащего 94% серебра и 6% графита и стали ШХ-15 коэффициент интенсивности изнашивания стального шара равен $I_{ш} = 4,46 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{м}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано сравнение коэффициентов трения в паре трения сталь ШХ-15 и антифрикционный мате-

риал на основе чистого серебра и с добавлением 6% графита.

Среднее значение коэффициента трения при пробеге 1200 м. в паре шар из стали ШХ-15 и кольцо с покрытием из антифрикционного материала, содержащего 94% серебра и 6% графита составило 0,157 и среднеквадратичное отклонение 0,004. Среднее значение коэффициента трения сталь по чистому серебру составил 0,29 при среднеквадратичном отклонении 0,007. Коэф-

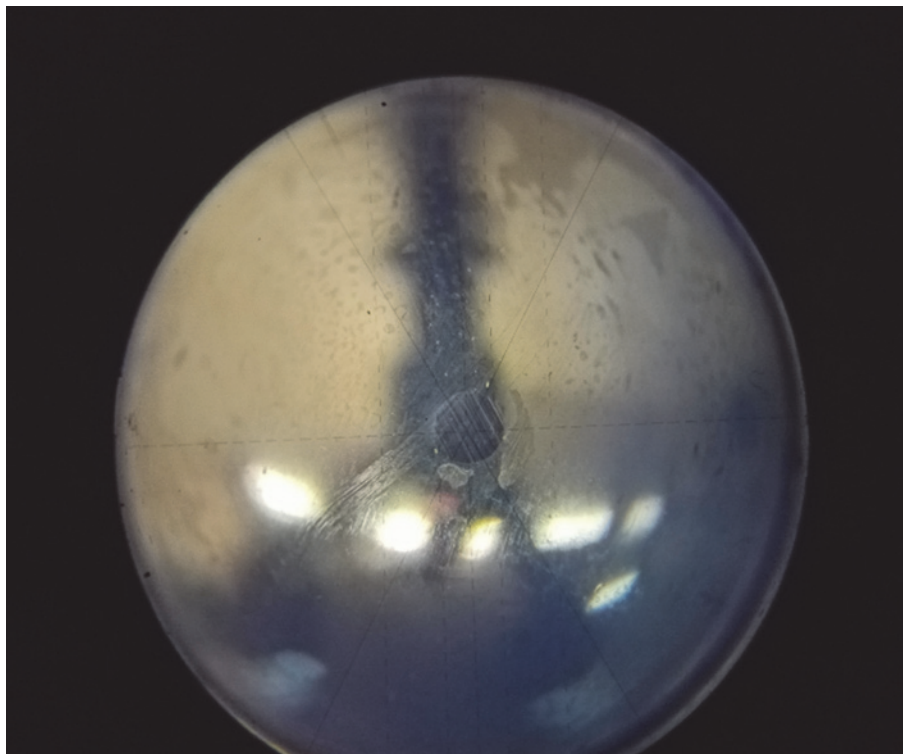


Рисунок 11 – Вид поверхности шара из стали ШХ-15 со следами износа после пробега 10000 м по кольцу с покрытием 94% серебра и 6% графита

коэффициент трения с течением времени начинает снижаться, что объясняется сглаживанием микронеровностей на поверхности антифрикционного материала. При пробеге 3000 м среднее значение коэффициента трения составило 0,155 при среднеквадратичном отклонении 0,004.

Таким образом выявлено, что при легировании серебряного покрытия графитом коэффициент трения снижается на 43...48%.

Для пары трения антифрикционного материала, содержащего 94% серебра и 6% графита и стали ШХ-15 коэффициент интенсивности изнашивания антифрикционной поверхности при контактном напряжении 330 МПа равен $I = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{м}$, а стального шара $I_{\text{ш}} = 4,46 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{м}$.

Следовательно, интенсивность изнашивания шара на два порядка ниже интенсивности изнашивания антифрикционного материала, поэтому износ шара можно не учитывать в расчётах на долговечность шарнирного подшипника. Полученная зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от максимальных контактных напряжений позволит разработать методику расчёта шарнирных подшипников на долговечность с антифрикционным покрытием ВТРН.49.040.01.002 на основе серебра с добавлением 6% графита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог 2012. ЕРК. Дивизион специальных подшипников. – Самара, : Изд-во ОАО «ЕПК Самара», 2012. – 54 с.

2. Подшипники шарнирные. Технические условия. ГОСТ 3635-78. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартами. – 26 с.
3. Spherical plain bearings plain bushes rod ends. Catalog 238. – INA-Schaeffler KG. – Herzogenaurach (Germany) – 176 s.
4. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). – Под ред. Ю.Н. Дроздова / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
5. Жильников, Е.П. Трение и изнашивание в узлах авиационной техники / Е.П. Жильников, В.Н. Самсонов. – Самара: Изд. Самарского аэрокосм. ун-та. -2007. – 143с.
6. Чернец, М.В. К вопросу расчета контактных давлений в металлополимерных подшипниках скольжения при изнашивании / М.В. Чернец, А.А. Корниенко, М.И. Пашечко, Ю.М. Чернец, А.И. Духота // Трение и износ. – 2021. – Т.42. – № 5. – С.552-561.
7. Балякин, В.Б. Экспериментальные исследования триботехнических характеристик радиационномодифицированного материала фторопласт – 4 с целью использования в опорах роторов / В.Б. Балякин, С.А. Хатипов, К.К. Пилла // Трение и износ. – 2015. – Т.36. – №4. – С. 448- 452.
8. Бабак, В.П. Антифрикционные наноструктурные стеклокомпозиционные самосмазывающиеся покрытия / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, С.Д. Харченко // Трение и износ. – 2022. – Т. 43. – № 3. – С. 327–335.
9. Балякин, В.Б. Повышение триботехнических параметров деталей из бронзы путём нанесения покрытия из молибдена / В.Б. Балякин, С.В. Фалалеев, Д.Е. Долгих, А.А. Юртаев // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 3. – С. 185-192.

10. Белов, Д.С. Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых покрытий TI-AL-NI-N и TI-AL-NI-MO-N к изнашиванию и эрозии / Д.С.

Белов, В.С. Сергевнин, И.В. Блинков, Н.И. Смирнов, А.В. Черногор // Трение и износ. – 2020. – Т.41. – № 2. – С. 136–144.

IMPROVEMENT OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF THE ANTI-FRICTION MATERIAL BASED ON SILVER DUE TO MODIFICATION WITH GRAPHITE IN ORDER TO INCREASE THE DURABILITY OF ARTICULATED BEARINGS

© 2024 V.B. Balyakin¹, A.A. Filippov², D.E. Dolgikh¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

² Vologda Plant of Special Bearings, Vologda, Russia

This article shows the possibility of improving the tribotechnical characteristics of a silver-based antifriction coating due to graphite alloying. A method for determining the friction coefficients and the wear rate of an antifriction material based on silver is presented. The results of comparing the friction coefficients in a friction pair of steel SHX-15 and an antifriction material based on pure silver and with the addition of 6% graphite to the melt are shown. It was found that when alloying a silver coating with graphite, the coefficient of friction decreases by 47...48%. For a friction pair of an antifriction material containing 94% silver and 6% graphite and steel SHX-15, the coefficient of wear intensity of the antifriction surface at a contact voltage of 330 MPa is $I = 1.96 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$, and for a counterbody in the form of a steel ball $I_{sh} = 4.46 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{m}$. Since the wear rate of the ball is two orders of magnitude lower than the wear rate of the antifriction material, the wear of the ball can be ignored in the calculations. The dependence of the coefficient of wear intensity on the maximum contact stresses is obtained, which will allow us to develop a methodology for calculating hinge bearings for wear.

Keywords: sample, friction, anti-friction coating, silver, graphite, TRB tribometer, profilometer, roughness, wear intensity, articulated bearings, ball.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-26-34

EDN: DDCQVD

REFERENCES

1. Каталог 2012. ERK. Divizion special'nyh podshipnikov. – Samara, : Izd-vo OAO «EPK Samara», 2012. – 54 s.
2. Podshipniki sharnirnye. Tekhnicheskie usloviya. GOST 3635-78.- M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniyu kachestvom produkci i standartami. – 26 s.
3. Spherical plain bearings plain bushes rod ends. Catalog 238. – INA-Schaeffler KG. – Herzogenaurach (Germany) – 176 s.
4. Drozdov, Yu.N. Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos, smazka). – Pod red. Yu.N. Drozdova / YU.N. Drozdov, E.G. YUdin, A.I. Belov. – M.: Eko-Press, 2010. – 604 s.
5. Zhil'nikov, E.P. Trenie i iznashivanie v uzlah aviacionnoj tekhniki / E.P. Zhil'nikov, V.N. Samsonov. – Samara: Izd. Samarskogo aerokosm. un-ta. -2007. – 143s.
6. Chernec, M.V. K voprosu rascheta kontaktnyh davlenij v metallopolimernyh podshipnikah skol'zheniya pri iznashivanii / M.V. Chernec, A.A. Kornienko, M.I. Pashechko, YU.M. Chernec, A.I. Duhota // Trenie i iznos. – 2021. – Т.42. – № 5. – S.552-561.
7. Balyakin, V.B. Eksperimental'nye issledovaniya tribotekhnicheskikh harakteristik radiacionno-modificirovannogo materiala ftoroplast – 4 s cel'yu ispol'zovaniya v oporah rotorov / V.B. Balyakin, S.A. Hatipov, K.K. Pilla // Trenie i iznos. – 2015. – Т.36. – №4. – S. 448-452.
8. Babak, V.P. Antifrikcionnye nanostrukturnye steklokompozicionnye samosmazывayushchiesya pokrytiya / V.P. Babak, V.V. SHChepetov, S.D. Harchenko // Trenie i iznos. – 2022. – Т. 43. – № 3. – S. 327–335.
9. Balyakin, V.B. Povyshenie tribotekhnicheskikh parametrov detalej iz bronzy putyom naneseniya pokrytiya iz molibdena / V.B. Balyakin, S.V. Falaleev, D.E. Dolgikh, A.A. YUrtaev // Trenie i iznos. – 2023. – Т. 44. – № 3. – S. 185-192.
10. Belov, D.S. Sravnenie stojkosti ionno-plazmennyh vakuumno-dugovyh pokrytij TI-AL-NI-N i TI-AL-NI-MO-N k iznashivaniyu i erozii / D.S. Belov, V.S. Sergevnin, I.V. Blinkov, N.I. Smirnov, A.V. Chernogor // Trenie i iznos. – 2020. – Т.41. – № 2. – С. 136–144.
11. Kovaleva, M.G. Tribotekhnicheskie svoystva pokrytij na osnove ugleroda i ugleroda, legirovannogo azotom, poluchennyh impul'snym vakuumno-dugovym metodom / M.G. Kovaleva, A.YA. Kolpakov, A.I. Poplavskij, M.E. Galkina, Zh.V. Gerus, R.A. Lyubushkin, M.V. Mishunin // Trenie i iznos. – 2018. – Т.39. – №4. – S. 433-437.

Valery Balyakin, Doctor of Technical Sciences, Head at the Department of Machine Desigh Fundamentals.

E-mail: vamicheev@ramler.ru

Alexandr Filippov, Deputy General Director

Dmitry Dolgikh, Graduate Student.