



**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
АВТОТРАНСПОРНЫХ МАШИН НА
ТЕМПЕРАТУРУ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ КАК
ФАКТОР РЕСУРСА**

Жачкин Сергей Юрьевич

д.т.н., профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства Воронежского государственного технического университета (ВГТУ), Воронеж, Россия

Пеньков Никита Алексеевич

к.т.н., начальник лаборатории ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия,

Лазарев Сергей Викторович

к.т.н., доцент, начальник кафедры аэродромно-технических средств ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия.

✉¹**Трифонов Григорий Игоревич**

младший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Аннотация.

Представлены результаты исследования зависимости температуры зоны трения двух тел (вал и внутренняя втулка) от эксплуатационных параметров подшипника скольжения, таких как давление, скорость скольжения и радиальная нагрузка в аспекте ресурса пары трения. На основе многофакторного эксперимента получено уравнение регрессии процесса трения, учитывающего влияние данных параметров на темпе-

**REGULARITIES OF THE INFLUENCE
OF OPERATING PARAMETERS OF
SLIDING BEARINGS OF AUTO-
TRANSPORT MACHINES ON THE TEM-
PERATURE IN THE FRICTION ZONE AS
A RESOURCE FACTOR**

Zhachkin Sergey Yurievich

doctor of technical sciences, professor of the Department of Automated Equipment of Machine-Building Production of the Voronezh State Technical University, Russia

Penkov Nikita Alexeyevich

candidate of technical sciences, head of the laboratory the Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russia,

Lazarev Sergey Viktorovich

candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of Aerodrome Equipment the Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russia.

✉¹**Trifonov Grigory Igorevich**

junior researcher the Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russia, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Annotation.

The results of the study of the dependence of the temperature of the friction zone of two bodies (shaft and the inner sleeve) are presented from the operational parameters of the sliding bearing, such as pressure, slip speed and radial load in the resource aspect of the friction pair. On the basis of a multi-factor experiment, the regression of the friction process was obtained, which takes into account the influence of these parameters on the

ратуру в зоне контакта, позволяющего определять границы безотказной работы пар трения автотранспортной техники. Предложены технологические пути решения обеспечения заданной работоспособности пары трения по температурному критерию без задиров.

Ключевые слова: ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ, ТРЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА, ДАВЛЕНИЕ, СКОРОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ, РАДИАЛЬНАЯ НАГРУЗКА, ЭКСПЕРИМЕНТ, БЕЗОТКАЗНОСТЬ.

temperature in the contact zone, which makes it possible to determine the borders of the trouble-free operation of the friction of motor vehicles. Technological ways are proposed to solve the problematic performance of the friction pair on the temperature criterion without scoring.

Keywords: SLIDING BEARING, FRICTION, TEMPERATURE, SPECIFIC PRESSURE, SLIDING SPEED, RADIAL LOAD, EXPERIMENT, RELIABILITY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние исследования и актуальность работы

При эксплуатации специальной и автотранспортной техники, в частности автомобилей, в их конструкциях используются подшипники скольжения (полукольца, втулки). Как известно [1-3], основным эксплуатационным фактором, влияющим на величину ресурса деталей особенно в условиях сухого и граничного трения, является их износостойкость. Стоит отметить, что при эксплуатации, ввиду разнопеременных нагрузок, величина износостойкости, безотказность работы, а, следовательно, и ресурс будут зависеть от назначенных режимов работы.

При работе в режиме граничного трения или трения без смазки сопротивляемость изнашиванию и образованию задиров во многом определяется видом материала, из которого изготовлена деталь [4]. И как следствие выбор элементов трущейся пары производится с учетом их совместимости.

На сегодняшний день целый спектр исследований посвящен основам трения, в частности, парам сухого и граничного трения [5-8], а также изучению физико-механических свойств трущихся тел, что позволяет опытным путем рассчитывать необходимые эксплуатационные параметры для дальнейшей работы деталей и механизмов в целом.

Испытания материалов на износ в условия сухого трения являются наиболее экстремальными и позволяют объективно оценить износостойкость сопряжений не только при сухом, но жидкостном и граничном трении, а также сократить длительность испытаний.

Целью данной работ является исследование и анализ температуры в зоне активного трения двух тел в зависимости от таких параметров, как давление, скорость скольжения и радиальная нагрузка.

2 Материалы и методы

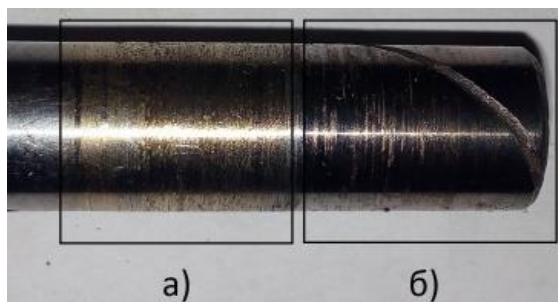
Ввиду проведенных в работе [9] исследований по подбору материала двух трущихся тел, в нашем случае вала (рис. 1) и внутренней втулки подшипника скольжения (рис. 2 и 3), для исследования зависимости температуры зона контакта от эксплуатационных параметров подшипника скольжения была выбрана пара трения из стали 40Х и бронзы БрАЖ9-4.

Необходимо отметить, что измерения проводились до разрушения тела, или значительных пластических деформаций. В качестве контртела выступали три образца:

1) Втулка, изготовленная из меднографитового сплава МГр90/3, Ra 0,6 (мкм) (рис. 2). Данная марка материала предназначена для работы в режиме сухого трения-скольжения [10].

2) Втулка, изготовленная из бронзы БрО10Ф1, Ra 0,84 (мкм) (рис. 3). Данная марка материала предназначена для работы пары трения с применением консистентных смазок [10].

3) Втулка, изготовленная из бронзы БрАЖ9-4, Ra 0,84 (мкм). Данная марка материала предназначена для работы в условиях интенсивного трения и истирания [10].



а – втулка из сплава МГр90/3; б – втулка из сплава БрО10Ф1

Рисунок 1 – Вал после испытаний на трение



Рисунок 2 – Втулка из сплава МГр90/3 после испытаний



Рисунок 3 – Втулка из сплава БрО10Ф1 после испытаний

Исследования эксплуатационных особенностей пары трения из стали 40Х и бронзы БрАЖ9-4 показали следующее:

1) Коэффициент трения обладает оптимальным значением из-за меньшей пластичности в сравнении с другими исследуемыми парами трения. Наличие твердых смазывающих частиц в зоне трения положительно влияет на режим работы подшипника скольжения, но при этом значительно ограничивает предельно допустимое давление [9, 11].

2) Процесс изнашивания выражается как перенос части поверхностного слоя материала с тела на контртело, в результате чего образовывается защитное покрытие [12, 13].

3) Происходит большое выделение тепла, то за счет высокого теплоотвода значительного влияния на процесс эксплуатации не наблюдается.

4) Результаты измерений и визуальный осмотр свидетельствовал о том, что поверхности трения в процессе испытаний притерлись, процесс переноса материала контртела на тело протекал замедленно.

После подбора оптимальных образцов, проведем исследования температуры в зоне активного сухого трения в диапазоне температур от 40 до 220 °С, при этом эксплуатационные параметры назначаем в диапазонах: скорость скольжения v от 0,93 до 2,76 (м/с); давление $P_{y\delta}$ от 20 до 30 (Н/мм²); радиальная нагрузка F_p от 397 до 403 (Н).

3 Результаты исследований

На основе заданных диапазонов скорости скольжения, давления и радиальной нагрузки подшипника скольжения было проведено планирование многофакторного эксперимента.

Оптимальные соотношения давления, радиальной нагрузки, скорости скольжения и температуры в процессе сухого трения вала и втулки подшипника определены на основе данных, полученных в ходе экспериментальных исследований. При планировании многофакторного эксперимента произведено построение двухуровневого плана полного факторного эксперимента 2^3 (ПФЭ 2^3) [14, 15].

Независимыми (варьируемыми) переменными или факторами ПФЭ 2^3 заданы следующие параметры: X_1 – давление $P_{y\delta}$, Н/мм²; X_2 – радиальная нагрузка F_p , Н; X_3 – скорость скольжения v , м/с.

Матрица планирования X факторного плана 2^3 (или план эксперимента 2^3 , заданного с помощью матрицы X) в безразмерном виде будет иметь вид

$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Максимальные предельные значения обозначены через +1, минимальные через –1.

Основной уровень и интервалы варьирования независимых переменных (факторов) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения факторов

Факторы	Основной уровень	Интервал варьирования
Давление, X_1	25	5
Радиальная нагрузка, X_2	400	3
Скорость скольжения, X_3	1,83	0,9

В качестве зависимой переменной y рассмотрим температуру контакта тела и контртела, которая возникает в процессе трения поверхности вала с поверхностью внутренней втулки подшипника за установленный промежуток времени внутри локально выделенного участка поверхности взаимодействия.

По плану ПФЭ 2^3 определяется 8 коэффициентов. По результатам обработки результатов трехфакторного эксперимента в программной среде Visual Basic было получено уравнение регрессии процесса трения вала из стали 40Х и втулки подшипника из сплава БрАЖ9-4:

$$y = 131,04 + 41,71x_1 + 1,96x_2 + 22,79x_3 + 10,46x_1x_2 - 5,04x_1x_3 - 28,63x_2x_3. \quad (2)$$

Коэффициент a_{123} (-1,62) при трех переменных меньше значения доверительного интервала $\varepsilon(a_i)$ (3,21) – это означает, что влияние межфакторного взаимодействия переменных X_1 , X_2 и X_3 на температуру незначительное, поэтому этот элемент из уравнения исключен.

Полученные линейные коэффициенты в линейном уравнении регрессии (2) полностью ха-

рактически характеризуют влияние изучаемых факторов на процесс. Так, коэффициент при $X_1 a_1 = 41,71$ означает, что увеличение давления от нулевого уровня величины этого фактора на один интервал варьирования вызывает увеличение температуры на $41,71$ °С. При интерпретации эффектов межфакторных взаимодействий необходимо учитывать сочетание знаков при безразмерном выражении факторов (при 1). Коэффициент $-28,63$ в уравнении (2) при межфакторном взаимодействии радиальной нагрузки и скорости скольжения только в том случае уменьшит температуру на это значение, когда эти факторы одновременно будут либо увеличены, либо уменьшены на интервал варьирования.

Полученное уравнение регрессии (2) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера $F_{рас} = 1,155$ меньше табличного $F_{табл} = 4,49$ ($F_{рас} < F_{табл}$) [16]. Графическая интерпретация исследуемых зависимостей представлена на рисунке 4.

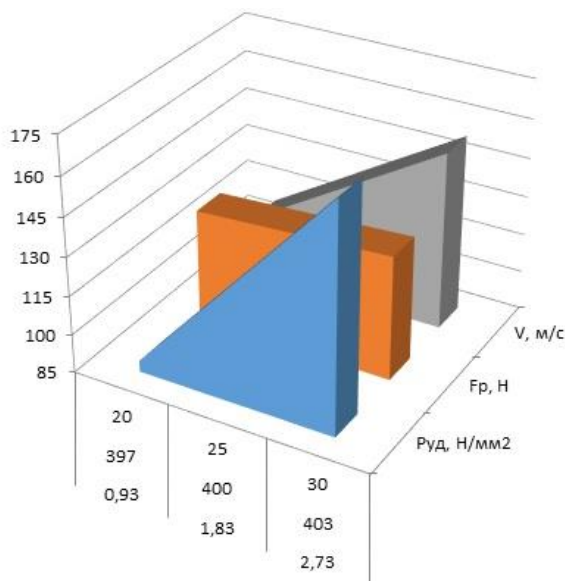


Рисунок 4 – График зависимостей температуры зоны трения от давления, радиальной нагрузки и скорости скольжения

Максимальная погрешность по плану ПФЭ 2^3 (8 коэффициентов) составила $2,69$ %, что говорит об адекватности и целесообразности проведенных исследований и расчетных операций [16-18].

4 Обсуждение и заключение

Полученное уравнение регрессии и составленный на его основе график зависимостей температуры в зоне трения от давления, радиальной нагрузки и скорости скольжения дает возможность оценки условий безотказной работы типового подшипника скольжения, типичного для узлов автотранспортных средств.

Интенсивность изнашивания деталей пары трения существенно зависит от температуры, так, по данным работы [19] она пропорциональна её шестой степени. Для подшипников скольжения узлов автотранспортной техники для рассмотренных материалов пары (сталь 40Х – бронза БрАЖ9-4) интенсивность изнашивания существенно определяется температурным режимом и давлением в зоне трения, приводящим с увеличением данных факторов по скорости до $2,73$ м/с и давлению – до 30 МПа, к увеличению температуры с 80 °С до 175 °С. Такое повышение температуры приводит к снижению прочностных свойств и износостойкости до двух раз [19-21], и может привести к отказам пар трения по причине схватывания, что является недопустимым отказом пары трения. Все это говорит о том, что целесообразно осуществлять мероприятия по снижению температуры в зоне трения использованием конструктивно-технологических способов (охлаждением, твердой смазкой, введением конструктивных элементов).

Список литературы

- 1 Крагельский И. В., Алисин В. В. Трение изнашивание смазка справочник // М. : Машиностроение, 1978. Книга 1. – 400 с.
- 2 Чичинадзе А. В., Берлинер Э. М., Браун Э. Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
- 3 Хопин П. Н. Оценка долговечности твердо смазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения // Трение и износ, 1995, Т. 16, № 4. – С. 787-793.
- 4 Бартенев Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. – Л. : Химия, 1972. – 240 с.
- 5 Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1965. – 202 с.
- 6 Леонов, С. Л. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей / С. Л. Леонов, А. А. Ситников, М. Е. Татаркин. – Ползуновский альманах, 2012, № 1. – С. 228-229.
- 7 Постников, В. С. Внутреннее трение в металлах / В. С. Постников – М. : Металлургия, 1974. – 351 с.
- 8 Ярош В. М., Моишеев А. А., Бронец М. А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ, 2003, Т. 24, № 6. – С. 626-635.
- 9 Жачкин, С. Ю. Разработка алгоритма оценки физико-механических показателей износостойкости пар сухого трения опорно-поворотного устройства воздушного судна / С. Ю. Жачкин, Г. И. Трифонов, А. В. Бакуменко // Воздушно-космические силы. Теория и практика. Вып. № 12. 2019. – С. 194-206.
- 10 Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский и др. Под общей ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко – М. : 2014. – 1216 с.
- 11 Трифонов, Г. И. Усовершенствование авиационных подшипников скольжения с помощью газотермической обработки и конструкторских модификаций / Г. И. Трифонов, Д. В. Митрофанов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. Вып. № 4. 2017. – С. 61-68.
- 12 Икрамов У. А. Расчетные методы оценки абразивного износа. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
- 13 Лещинский, Л. К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар // К. : Тэхника, 1990. – 109 с.
- 14 Грачев Ю. П., Плаксин Ю. М. Математические методы планирования эксперимента. – М. : ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
- 15 Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований : метод. указания / сост. А. Н. Гайдадин, С. А. Ефремова // ВолГТУ. – Волгоград, 2008. – 16 с.
- 16 Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М. : «Мир», 1977. – 552 с.
- 17 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // АН СССР. Науч. совет по комплексной проблеме «Кибернетика». Секция «Мат. теория эксперимента». – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
- 18 Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С. М. Ермакова. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 392 с.
- 19 Погодаев, Л. И. Повышение надежности трибосопряжений / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин, П. П. Дудко. – С-Пб. : Академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304 с.
- 20 Тененбаум М. М. Сопrotивление абразивному изнашиванию // М. : Машиностроение, 1976. – 271 с.
- 21 Белый, В. А. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А. И. Свириденко, М. И. Петровец, В. Г. Савкин. – Минск. : Наука и техника, 1976. – 432 с.

References

- 1 Kragelsky I. V., Alisin V. V. Friction wear lubrication handbook // Moscow : Mashinostroenie, 1978. Book 1. – 400 p.
- 2 Chichinadze A. V., Berliner E. M., Brown E. D., etc. Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics). – Moscow : Mashinostroenie, 2003. – 576 p.
- 3 Hopin P. N. Evaluation of durability of solid lubricating coatings based on the analysis of the topography of friction surfaces // Friction and Wear, 1995, vol. 16, №. 4. – pp. 787-793.
- 4 Bartenev G. M., Lavrentiev V. V. Friction and wear of polymers. – L. : Chemistry, 1972. – 240 p.
- 5 Landau L. D. Theory of elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshits. – M. : Nauka, 1965. – 202 p.
- 6 Leonov S. L. Modeling of wear of deposited surfaces of parts / S. L. Leonov, A. A. Sitnikov, M. E. Tatarkin. – Polzunovsky Almanac, 2012, №. 1. – pp. 228-229.
- 7 Postnikov V. S. Internal friction in metals / V. S. Postnikov – M. : Metallurgy, 1974. – 351 p.
- 8 Yarosh V. M., Moiseev A. A., Bronovets M. A. Investigation of materials for friction and wear in open space in orbit around the Moon // Friction and wear, 2003, vol. 24, №. 6. – pp. 626-635.
- 9 Zhachkin S. Yu. Development of an algorithm for evaluating the physico-mechanical wear resistance of dry friction pairs of the aircraft pivot device / S. Yu. Zhachkin, G. I. Trifonov, A. V. Bakumenko // Aerospace forces. Theory and practice. Issue №. 12. 2019. – pp. 194-206.
- 10 Vintage of steels and alloys. 4th ed., reworked. and additional / Yu. G. Dragunov, A. S. Zubchenko, Yu. V. Kashirsky, etc. Under the general editorship of Yu. G. Dragunov and A. S. Zubchenko – M. : 2014. – 1216 p.
- 11 Trifonov G. I. Improvement of aircraft sliding bearings with the help of gas-thermal treatment and design modifications / G. I. Trifonov, D. V. Mitrofanov // Aerospace forces. Theory and practice. Issue №. 4. 2017. – pp. 61-68.
- 12 Ikramov U. A. Computational methods for assessing abrasive wear. – M. : Mechanical Engineering, 1987. – 288 p.
- 13 Leshchinsky L. K. Plasma surface hardening / L. K. Leshchinsky, S. S. Samotugin I. I. Pirch, V. I. Komar // K. : Tekhnika, 1990. – 109 p.
- 14 Grachev Yu. P., Plaksin Yu. M. Mathematical methods of experiment planning. – M. : Delhi print, 2005. – 296 p.
- 15 The use of a full factorial experiment in conducting research: method. instructions / comp. A. N. Gaidadin, S. A. Efremova // VolgSTU. – Volgograd, 2008. – 16 p.
- 16 Hartman K. et al. Planning an experiment in the study of technological processes. – M. : «Mir», 1977. – 552 p.
- 17 Adler Yu. P. Experiment planning in the search for optimal conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky // USSR Academy of Sciences. Sci. advice on the complex problem of «Cybernetics». Section «Mathematical theory of experiment». 2nd ed., reprint. and additional – Moscow : Nauka, 1976. – 279 p.
- 18 Mathematical theory of experiment planning / Edited by S. M. Ermakov. – M. : Nauka. The main edition of the physical and mathematical literature, 1983. – 392 p.
- 19 Weather, L. I. Improving the reliability of tribersers / L. I. Weather, V. N. Kuzmin, P. P. Dudko. – C-PB: Academy of Transport of the Russian Federation, 2001. - 304 p.
- 20 Tenenbaum M. M. Resistance to abrasive wear // Moscow : Mashinostroenie, 1976. – 271 p.
- 21 Bely V. A. Friction and wear of polymer-based materials / V. A. Bely, A. I. Sviridenok, M. I. Petrovets, V. G. Savkin. – Minsk. : Science and Technology, 1976. – 432 p.