

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ТЕКСТУРИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, С.В. Чернейко

Приводятся результаты по исследованию влияния микропрофиля смазочного слоя на гидромеханические характеристики упорных подшипников скольжения. Кратко описаны способы обработки и принцип образования несущей способности трибосопряжений с текстурированием поверхностей. Более подробно изложены преимущества и недостатки, основные параметры лазерного текстурирования поверхности.

Ключевые слова: упорный подшипник, несущая способность, коэффициент жидкостного трения, поверхность с лазерным текстурированием.

Введение. Современные тенденции развития отдельных отраслей транспортного и энергетического машиностроения предполагают разработку роторных машин с большей производительностью и повышенными требованиями по их ресурсу. Одним из основных узлов, во многом определяющим надежность и эксплуатационные характеристики данного класса машин, является упорный узел, состоящий из пяты и подпятника (подшипник, воспринимающий осевые нагрузки), к которому предъявляются следующие требования: высокая несущая способность (НС), минимальное трение и изнашивание рабочих поверхностей в течение заданного ресурса, высокая виброустойчивость на всех режимах работы, малый расход смазочного материала, технологичность и удобство в эксплуатации.

В настоящее время наибольшее распространение получили упорные подшипники скольжения (УП), работающие в режиме жидкостного трения. Для получения избыточных гидродинамических давлений смазочный слой (СС) должен иметь форму клина, толщина которого уменьшается в направлении движения [1]. Как правило, УП с неподвижными сегментами разделяют на две основные группы: ступенчатые плоскости (с одной ступенькой), которые являются развитием идеи Рэйлея, опубликованной им в 1918 г. [2], и подшипники, в которых неподвижные сегменты выполнены в виде наклонных плоскостей.

В то же время, начиная с 80-х годов XX века, развивается и другое направление, учитывающее не только макро-, но и микропрофиль поверхностей трения.

В работах [3, 4] авторы провели исследование влияния шероховатости поверхностей трения и формы СС на гидромеханические характеристики (ГМХ) трибосопряжения, используя модель «бесконечно длинного» подшипника с продольными канавками для изотермического случая. Для выполнения расчетов была применена стохастическая модель шероховатости. Используя ТНД (Total Harmonic Distortion) метод, авторы работы [5] исследовали влияние неровности поверхности трения на модели «бесконечно длинного» плоского подшипника скольжения и сделали вывод, аналогичный авторам работ [3, 4]: при вращении ротора смазочный материал (СМ) взаимодействует с микровыступами на поверхности УП и как следствие в СС образуются «микроклинья», которые и увеличивают НС.

С помощью программы «Navier – Stokes Computational Fluid Dynamics» авторы работы [6] смоделировали 3D-геометрию микроканалов, нанесенных на сегменты подпятника и рассчитали НС подшипника. Также были выполнены параметрические исследования влияния отклонений геометрии обработанной поверхности от допусков на НС и коэффициент трения для заданных размеров подшипника. Сделан вывод, что в большинстве случаев отклонения от заданного микропрофиля поверхности подпятника не ухудшают ГМХ упорных гидродинамических подшипников.

В статье [7] рассматриваются два типа УП (первый состоит из пяты и подпятника, второй – из пяты, подпятника и промежуточного диска) с нанесением винтовых канавок на его несущей поверхности. Проведено экспериментальное исследование влияния износа поверхностей трения

подшипника на его НС; дан расчет предельной НС. По полученным данным сделаны следующие выводы: предельная НС определяется преимущественно винтовыми канавками, нанесенными на несущей поверхности подпятника, и толщиной СС; подшипник с промежуточным диском имеет более высокую НС; при конструировании УП с винтовыми канавками следует учитывать износ поверхностей.

На сегодняшний день в производстве и научных исследованиях кроме винтовых и продольных (поперечных) канавок широкое распространение получили и другие формы текстурированной поверхности: микроплощадки [8, 9] и микроямки [10].

Текстурирование поверхности можно выполнить различными способами. Коста и Хатчингс [11] использовали фотохимическое травление для текстурирования металлической поверхности. Для обработки УП из карбида кремния Ванг применял реактивное ионное травление [8, 9]. Хоуперман и Кордт в качестве высокопроизводительного способа обработки предлагают использовать Nd:YAG-лазер [12]. В работе указывается, что лазерное текстурирование поверхности можно эффективно использовать не только при жидкой (несжимаемой) смазке, но также и в сухих газовых уплотнениях.

В работах [8, 9] Ванг, Като и др. представили результаты выполненных экспериментов на УП, смазываемые водой. Исследовано влияние микроплощадок на критическую нагрузку при переходе от гидродинамического к смешанному типу смазки. Текстурирование несущей поверхности позволяет эффективно повышать НС упорного подшипника из карбида кремния, если использовать в качестве СМ воду, в данном случае в СС образуется трибохимическая реакция. Авторы сделали следующие выводы: существует оптимальная геометрия ямки и площадь распределения ямок (отношение площади обработанной поверхности к необработанной). При оптимальных значениях данных параметров критическую нагрузку, при которой происходит повреждение поверхности (задир), можно увеличить как минимум в два раза по сравнению с необработанной поверхностью.

Из анализа работ [1–12], следует, что геометрия поверхности оказывает значительное влияние на НС упорного сегментного подшипника скольжения, а определение оптимальных параметров макро- и микропрофиля поверхности позволяет улучшить ГМХ. С развитием техники появилась возможность обрабатывать и исследовать микропрофиль несущей поверхности с высокой точностью, в связи с чем многие авторы поставили задачу исследовать микротекстурирование поверхности УП. Одним из наиболее перспективных направлений является *лазерное текстурирование поверхности*. Поэтому для выявления преимуществ и недостатков данной технологии были проведены анализ и оценка основных параметров лазерного текстурирования на основе выполненного обзора литературных источников.

Лазерное текстурирование поверхности. Процесс лазерного текстурирования можно описать как вскрытие поверхностного слоя подшипника пульсирующим лазерным лучом, в зависимости от силы луча и скорости обработки на поверхности появляется множество микроямок с заданным диаметром и глубиной.

Хотя лазерное текстурирование имеет много преимуществ: быстрая, легкая и очень эффективная технология [12], также есть и недостатки [13]: в результате лазерного плавления материала соседние области могут быть обрызганы, из-за чего появляются выступы и неровности. Таким образом после текстурирования необходимо выполнять полировку образцов. В некоторых случаях мощность излучения лазера может быть настолько сильной, что при обработке появляются трещины в соседних областях, из-за этого прочность образца сильно снижается. Однако на сегодняшний момент развитие промышленного оборудования позволяет обеспечить высокую точность обработки и не допустить повреждение поверхности.

Необходимо отметить некоторые особенности текстурированной поверхности, которые позволяют улучшить ГМХ подшипников скольжения. Выступы или микроямки на гладкой поверхности подшипника работают по принципу «ступеньки Рэйлея». Когда поток смазки приближается к выступу, давление увеличивается, а с противоположной стороны – снижается, но уже на меньшую величину [12]. В результате перепада давлений в СС появляется НС.

Текстурирование поверхностей трения подшипника скольжения позволяет уменьшить их износ, когда СМ попадает в микроуглубления поверхности и удерживается в них, то есть действует как «второй источник смазки» [14]. Перемещение СМ из этих областей на соседние позволяет

уменьшить потери на трение и замедлить гидроабразивный износ, особенно при смешанном и граничном трении. Во время эксплуатации двигателя внутреннего сгорания в СМ появляются частицы износа, которые попадают в микроямки и удерживаются в них, что позволяет снизить повреждение рабочих поверхностей УП.

Фундаментальные работы по изучению лазерного текстурирования поверхности опубликованы Этсионом и его учениками [15–17]. Авторами выполнены исследования влияния текстурирования несущей поверхности различных трибосопряжений: механических и газовых уплотнений, упорных гидродинамических подшипников, а также узлов, совершающих возвратно-поступательное движение (компрессионные кольца).

Брицмер и Этсион в качестве объекта исследования использовали УП с нанесением на его несущую поверхность лазерного текстурирования в виде микроямок [15]. В результате выполненных расчетов получен размер ямки и площадь обрабатываемой поверхности, при которых возникает максимальная НС. Представлено два механизма образования поля гидродинамических давлений в СС подшипника:

1. «Индивидуальный эффект» микроямок (обрабатывается вся поверхность сегментов УП) – каждая ямка работает как гидродинамический подшипник, связей между ямками нет, поэтому НС увеличивается незначительно.

2. «Коллективный эффект» микроямок (обрабатывается часть поверхности сегментов УП) существенно увеличивает НС упорного гидродинамического подшипника и, если использовать оптимальные размеры ямок, площадь обрабатываемой поверхности и максимальную плотность распределения ямок, можно получить НС, значения которой сопоставимы с НС подшипника с сегментами в виде ступеньки Рэйлея.

В работе [16] авторы провели теоретическое исследование влияния микроямок, нанесенных на поршневых кольцах. Основные выводы, сделанные авторами: текстурирование позволяет повысить НС; наибольшее влияние на коэффициент трения и толщину СМ оказывают количество ямок в одном ряду и соотношение глубины к радиусу ямки, при этом изменение плотности распределения ямок позволяет снизить силу трения не более чем на 7 %. Однако по полученным результатам авторы считают очевидным снижение силы трения на 30 % при текстурировании несущей поверхности по сравнению с необработанной. Рык, Клигерман и Этсион провели серию экспериментов на компрессионных кольцах, подтверждающих теоретические предположения, сделанные в работе [16], в экспериментах в зону контакта пары трения подавалось моторное масло, соответствующее классу вязкости SAE-40 [17]. По сравнению с необработанными кольцами при использовании текстурированных образцов сила трения снизилась на 40 %. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошее согласование полученных результатов. Отмечается, что сила трения ниже при использовании масла с более низкой вязкостью и с оптимальной глубиной ямки.

Текстурированную поверхность можно использовать для устранения «залипания» и адгезии в точных устройствах [18]. Сегодня данное свойство текстурированной поверхности исследуется на коммерческой основе у всех производителей жестких дисков [19, 20]. В таких устройствах максимальная толщина слоя составляет всего несколько нанометров и поддержание постоянной толщины слоя необходимо для их нормальной работы.

Выводы. В ЮУрГУ и в частности в вузовско-академической лаборатории «Триботехника» ведутся работы по исследованию макро и микропрофиля поверхностей трения.

Так, в работах [23–25] авторы исследуют влияние свойств СМ и шероховатости поверхности на ГМХ трибосопряжения поршень-цилиндр и делают акцент на том, что контактное взаимодействие элементов пары трения происходит на площадках фактического контактирования, что, в частности, экспериментально подтверждается образованием «натиров» на юбке поршня дизельного двигателя после определенной наработки [21]. Поэтому расчетные характеристики трибосопряжений предлагают дополнять относительными значениями суммарных за цикл нагружения величин протяженности областей, где значения толщины СС меньше допустимых (продолжительность контактного взаимодействия) [22, 23].

В работе [24] рассматриваются газодинамические опоры четырех макрогеометрических форм со спиральными и винтовыми микроканавками, которые наносятся на несущей поверхности подшипников скольжения, воспринимающих радиальных и осевые нагрузки. Динамика свобод-

ного движения ротора изучается с использованием матрицы передаточных функций подшипника. Можно отметить несколько выводов, сделанных автором: при уменьшении установочных зазоров в УП до 2 мкм система ротор – поплавков становится устойчивой; для каждой комбинации зазоров СС существует оптимальное значение глубин канавок в УП.

Проведена экспериментальная работа по определению влияния лазерного текстурирования на НС и потери на трение УП, смазываемых водой [25]. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать ГМХ упорных сегментных подшипников скольжения с различным профилем несущей поверхности [26, 27].

Текстурирование поверхностей трения является одним из приоритетных научных направлений исследований лаборатории «Триботехника».

Литература / References

1. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения. Л.: Машиностроение, 1981. 261 с. [Podolskiy M.E. *Upornye podshpniki skolzheniya* (Thrust Bearing). Leningrad, Mashinostroenie, 1981. 261 p.]
2. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле. М.: Машгиз, 1962. 296 с. [Kameron A. *Teoriya smazki v inzhenernom dele* (Theory of Lubrication in Engineering). Leningrad, Mashgiz, 1962. 296 p.]
3. Andharia P.L., Gupta J.L., Deheri G.M. On the Shape of the Lubricant Film for the Optimum Performance of a Longitudinal Rough Slider Bearing. *Indus. Lubric. Tribol.*, 2000, vol. 52, pp. 273–279.
4. Andharia P.L., Gupta J.L., Deheri G.M. Effect of Surface Roughness on Hydrodynamic Lubrication of Slider Bearings. *Tribo Trans*, 2001, vol. 44, pp. 291–298.
5. Huynh P.B. Numerical Study of Slider Bearings with Limited Corrugation. *ASME J Tribol.*, 2005, vol. 127, pp. 582–595.
6. Charitopoulos A.G., Efstathiou E.E., Papadopoulos C.I., Nikolakopoulos P.G., Kaiktsis L. Effects of Manufacturing Errors on Tribological Characteristics of 3-D Textured Micro-Thrust Bearings. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2013, vol. 189, pp. 145–151.
7. Furuishi Y., Suganami T., Misubishi T., Yamamoto S., Tokumitsu K. Performance of Water-Lubricated Flat Spiral Groove Bearings. Проблемы трения и смазки. 1983. Т. 105, № 3. С. 94–103. [Furuishi Y., Suganami T., Misubishi T., Yamamoto S., Tokumitsu K. *Friction and Wear*, 1983, vol. 105, no. 3, pp. 94–103.]
8. Wang X., Kato K., Adachi K. The Lubrication Effect of Micro-Pits on Parallel Sliding Faces of SiC in Water. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45 (3), pp. 294–301.
9. Wang X., Kato K., Adachi K., Aizawa K. Loads Carrying Capacity Map for the Surface Texture Design of Sic Thrust Bearing Sliding in Water. *Tribology International*, 2003, vol. 36, no. 3, pp. 189–197.
10. Tsuboi R., Nakano A., Sasaki S. Research on Causes of Cavitation Generation on Textured Surface under Hydrodynamic Lubrication. *40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology and Tribochemistry Forum 2013*, 4–6 Sept. 2013. Lyon, 2013. p. 203.
11. Costa, H.L., Hutchings I.M. Hydrodynamic Lubrication of Textured Steel Surfaces under Reciprocating Sliding Conditions. *Tribology International*, 2007, vol. 40, no. 8, pp. 1227–1238.
12. Hoppermann A., Kordt M. Tribological Optimisation Using Laser-Structured Contact Surfaces. *Oelhydraulik und Pneumatik*, 2002, vol. 46, no. 4, pp. 560–564.
13. Wang X., Kato K., Adachi K., Aizawa K. The Effect of Laser Texturing of Sic Surface on the Cri-Tical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed. *Tribology International*, 2001, vol. 34, no. 10, pp. 703–711.
14. Lo S.W., Horng T.C. Lubricant Permeation from Micro Oil Pits under Intimate Contact Condition. *Trans ASME, Journal of Tribology*, 1999, vol. 121, no. 10, pp. 633–638.
15. Brizmer V., Kligerman Y., Etsion I. A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing. *Tribology Transactions*, 2003, vol. 46, no. 3, pp. 397–403.
16. Ronen A., Etsion I., Kligerman Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. *Tribology Transactions*, 2001, vol. 44, no. 3, pp. 359–366.
17. Ryk G., Kligerman Y., Etsion I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, no. 4, pp. 444–449.

18. Bulatov V.P., Krasny V.A., Schneider Y.G. Basics of Machining Methods to Yield Wear and Fretting Resistive Surfaces, Having Regular Roughness Patterns. *Wear*, 1997, vol. 208, pp. 132–137.

19. Komvopoulos K. Adhesion and Friction Forces in Microelectromechanical Systems: Mechanisms, Measurement, Surface Modification Techniques, and Adhesion Theory. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 2003, vol. 17, no. 4, pp. 477–517.

20. Wood K.L., Neikirk D., Busch-Vishniac I., Weldon W., Chu C.-S., Kim Y., Gupta V., Maddox W., Masser D. MEMs Hydrodynamic Bearings: Applications to and Implications for Machine Failure Prevention. *TriboTest.*, 1998, vol. 4, no. 3, pp. 275–288.

21. Рождественский Ю.В., Гаврилов К.В. Современные конструкции поршней для тепловых двигателей: учеб. пособие. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. 50 с. [Rozhdestvenskiy Y.V., Gavrilov K.V. *Sovremennyye konstruksii porshnei dlya teplovykh dvigateley* (Contemporary Design of Engine Piston). Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2009. 50 p.]

22. Рождественский Ю.В., Гаврилов К.В., Мухортов И.В., Дойкин А.А. Влияние вязкостно-температурных свойств моторных масел на гидромеханические характеристики трибосопряжения поршень-цилиндр. Двигателестроение. 2010. № 2. С. 23–26. [Rozhdestvenskiy Y.V., Gavrilov K.V., Mukhortov I.V., Doykin A.A. (Influence Viscosity-Temperature Characteristic of Motor Oil on the Hydromechanical Characteristic of Tribounit Piston-Cylinder). *Dvigatellestroenie*, 2010, no. 2, pp. 23–26. (in Russ.)]

23. Goryacheva I.G., Morozov A.V., Rozhdestvenskiy Yu.V., Gavrilov K.V., Doikin A.A. Development of Method for Calculating and Experimentally Assessing Tribological Parameters of Piston-Cylinder Pair of Diesel Engine. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 5, pp. 339–348.

24. Дадаев С.Г. Нестационарные модели газодинамических подшипников со спиральными канавками: моногр. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. Ч. 3. 430 с. [Dadaev S.G. *Nestatsionarnyye modeli gazodinamicheskikh podshipnikov so spiralnymi kanavkami* (Nonstationary Model Gas-Dynamic Bearing with Spiral Groove). Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012. 430 p.]

25. Чернейко С.В., Ципенюк А.М. Экспериментальная оценка характеристик упорного гидродинамического подшипника с параллельными поверхностями. Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2014. Т. 14, № 2. С. 66–73. [Cherneyko S.V., Tsipinuk A.M. (Experimental Estimation of Characteristics of the Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 66–73. (in Russ.)]

26. Программный комплекс для расчета гидромеханических характеристик секторного упорного гидродинамического подшипника с различной обработкой поверхности «Секторный подпятник»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013617906 Российская Федерация / А.К. Бояршинова, С.В. Чернейко. № 2013616054; заявл. 15.07.2013. [Boyarshinova A.K., Cherneyko S.V. *Programmnyy kompleks dlya rascheta gidromekhanicheskikh kharakteristik sektornogo upornogo gidrodinamicheskogo podshipnika s razlichnoy obrabotkoy poverkhnosti "Sektornyy podpyatnik"* (Program Complex for Calculation of Hydromechanical Characteristics of the Sector Persistent Hydrodynamic Bearing with Various Processing of a Surface "A Sector Thrust Bearing"). Certificate on the State Registration of the Computer Program 2013617906 Russian Federation, no. 2013616054, Application 15.07.2013.]

27. Программный комплекс для расчета характеристик упорного гидродинамического сегментного подшипника Релея с лазерным текстурированием поверхности «Секторный подпятник – II»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014614568 Российская Федерация / А.К. Бояршинова, С.В. Чернейко. № 2014610405; заявл. 27.01.2014. [Boyarshinova A.K., Cherneyko S.V. *Programmnyy kompleks dlya rascheta kharakteristik upornogo gidrodinamicheskogo segmentnogo podshipnika Releya s lazernym teksturovaniem poverkhnosti "Sektornyy podpyatnik – II"* (Program Complex for Calculation of Characteristics of the Persistent Hydrodynamic Segment Bearing of Rayleigh with Laser Texturing of a Surface "A Sector Thrust Bearing – II"). Certificate on the State Registration of the Computer Program 2014614568 Russian Federation, no. 2014610405, Application 27.01.2014.]

Рождественский Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ruv@susu.ac.ru.

Гаврилов Константин Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), gavrilovkv1@rambler.ru.

Чернейко Сергей Викторович. Аспирант кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), sergeycherneiko@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 июня 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Mechanical Engineering Industry"
2014, vol. 14, no. 3, pp. 16–21**

WAYS OF INCREASE OF THE LOAD-CARRYING ABILITY HYDRODYNAMIC TRIBOUNIT WITH LASER TEXTURING OF FRICTION SURFACES

*Y.V. Rozhdestvenskiy, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ruv@susu.ac.ru,
K.V. Gavrilov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, gavrilovkv1@rambler.ru,
S.V. Cherneyko, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
sergeycherneiko@mail.ru*

Results on research of influence of the form of a lubricant layer on hydromechanical characteristics of thrust bearing are offered. Ways of processing technique and principle formation of the load-carrying ability of tribounit wick one of its surface has laser texturing short described. Advantages and lacks, key parameters laser texturing are in more details stated.

Keywords: thrust bearing, load capacity, liquid friction coefficient, laser surface textured.

Received 27 June 2014