

Расчет и конструирование

УДК 55.42.31+55.03.33

DOI: 10.14529/engin220401

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛУНЖЕРНОЙ ПАРЫ ТОПЛИВНОГО НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL

К.В. Гаверолов, В.С. Худяков, И.К. Умурзаков, Е.А. Подвысоцкая
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Снижение трения является ключевой задачей современного машиностроения. Снижение трения влияет на эффективность, надежность, экономичность и эргономичность различных машин и механизмов. Одной из главных причин дополнительных энергетических затрат и неисправностей механических систем является износ, вызванный процессами трения. Большинство современных двигателей оснащены системой впрыска топлива Common Rail, обеспечивающей экономию топлива, пониженный уровень выбросов и высокую мощность двигателя. Топливный насос высокого давления является одним из наиболее важных элементов системы впрыска топлива, эксплуатационные характеристики которого критически влияют на производительность всей топливной системы. Плунжер топливного насоса подвергается повышенным нагрузкам, а его условия смазывания являются крайне нестабильными в условиях динамических нагрузок, что ведет к повышенному и преждевременному износу. Технология лазерного микротекстурирования поверхности активно применяется в промышленном секторе, а ее положительное влияние на снижение трения и улучшение противоизносных свойств подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями. Целью данной статьи является оценка влияния текстурирования на гидромеханические характеристики плунжерной пары, чтобы повысить энергоэффективность топливной системы современных дизельных двигателей. Расчеты проводились в коммерческом программном комплексе ANSYSFluent. Исходя из результатов исследования, применение текстурирования на поверхности плунжера топливного насоса высокого давления может оказывать как положительное, так и негативное влияние на его эксплуатационные характеристики. Поэтому подбор оптимальных геометрических характеристик микрогеометрии является определяющим фактором при эффективном использовании поверхностей с особой топографией в различных машинах и механизмах.

Ключевые слова: *плунжерная пара, ТНВД, потери на трение, микрогеометрия, трибосопряжения.*

Введение

На сегодняшний день задача снижения трения является ключевой для современного машиностроения. Снижение трения необходимо, чтобы машины и механизмы имели высокий коэффициент полезного действия (КПД), надежность, экономичность и легкость в эксплуатации. Основным источником потери энергии и отказов механических систем является износ, вызванный трением. С глобальной точки зрения трение в двигателе представляет собой незначительную часть потерь мощности, которая определяет его КПД, хотя в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) тратится примерно 30 % энергии на преодоления потерь на трение [1, 2].

Современные двигатели невозможно представить без системы впрыска топлива CommonRail (CR), которая обеспечивает лучшую экономию топлива, более низкий уровень выбросов и высокую мощность дизельного двигателя [3, 4]. Компоненты насоса подвергаются высоким нагрузкам из-за сжатия топлива под высоким давлением. Топливный насос высокого давления (ТНВД) является одним из наиболее важных элементов системы CR, производительность которого напрямую влияет на работу всей системы [5]. Повышение давления топлива в верхней части плунжерной камеры в сочетании с регулярно изменяющейся скоростью требует улучшения характеристик смазки плунжерной пары [6]. При возрастании давления увеличивается износ плунжера, а условия смазывания ухудшаются, что негативно сказывается на эффективности топливной сис-

Расчет и конструирование

темы [7, 8]. Несмотря на вышеперечисленные факторы, некоторые авторы отмечают малое количество научных работ, посвященных рабочему процессу ТНВД [9].

В последние годы набирает популярность применение текстурированных поверхностей для уменьшения трения и повышения противоизносных свойств трибологических сопряжений [10–12]. Технология лазерного текстурирования поверхности широко используется в промышленности, а ее положительное влияние на снижение трения и улучшение противоизносных свойств теоретически предсказано и экспериментально подтверждено [13–15].

Исследования [16, 17] показали, что применение лазерного текстурирования улучшило гидродинамическую смазку механических уплотнений, положительным образом сказалось на изменении нагрузочной способности, коэффициенте трения, а также снижении износа по сравнению с поверхностями трения без текстурирования.

В статье [18] представлена созданная авторами модель смазки, учитывающая шероховатость поверхности текстурированных гильз цилиндров. Благодаря созданию особой топографии на поверхности гильз цилиндров улучшилась смазывающая способность, а также снизился износ.

В работах [19, 20] представлены результаты влияния лазерного текстурирования поверхности плунжера на улучшение уплотняющих характеристик и снижение износа плунжерной пары в дизельных двигателях. Результаты трибологических испытаний показали, что глубина наибольшего износа уменьшилась на 72,4 %, а средняя шероховатость снизилась на 22,6 %. Стендовые испытания двигателя выявили, что количество утечек топлива сократилось на 73,1 %. Экспериментальные результаты показали, что средний коэффициент трения уменьшился на 27,8 %. Пример текстурирования поверхности плунжера представлен на рис. 1.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение эффективности плунжерной пары ТНВД с помощью применения текстурирования на поверхности плунжера является актуальной задачей. Целью данной статьи является оценка влияния текстурирования на гидромеханические характеристики плунжерной пары для повышения энергоэффективности топливной системы в современных ДВС.

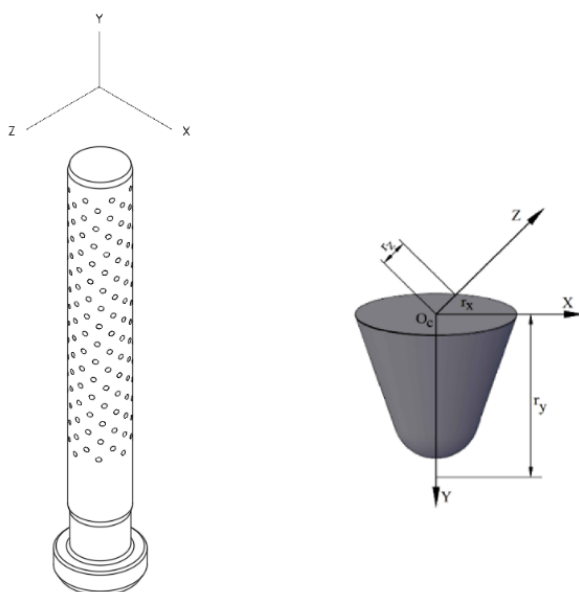


Рис. 1. Пример текстурирования поверхности плунжера

1. Геометрия и граничные условия

Объектом исследования для гидродинамического расчета является плунжерная пара ТНВД для перспективного дизельного двигателя. Конструкция гидравлической головки в сборе, взятая за основу для численного моделирования, представлена на рис. 2.

Принцип работы ТНВД системы Common Rail состоит в следующем. Плунжер приводится в возвратно-поступательное движение благодаря кулачкам приводного вала. При возвратном движении плунжера объем камеры сжатия увеличивается, из-за чего возникает перепад давлений. Под действием перепада открывается впускной клапан, и дизельное топливо попадает в камеру

сжатия. При движении плунжера вверх происходит увеличение давления в камере сжатия и впускной клапан закрывается. Как только давление в камере превышает определенный порог, открывается выпускной клапан и топливо поступает в аккумулятор высокого давления.

Расчет проводился в коммерческом программном комплексе ANSYSFluent. При моделировании течение рабочей жидкости принималось ламинарным. Для *Pressure-based* решателя использовался алгоритм *Coupled*, где в качестве способа оценки градиентов применялся метод наименьших квадратов *LeastSquaresCellBased*.

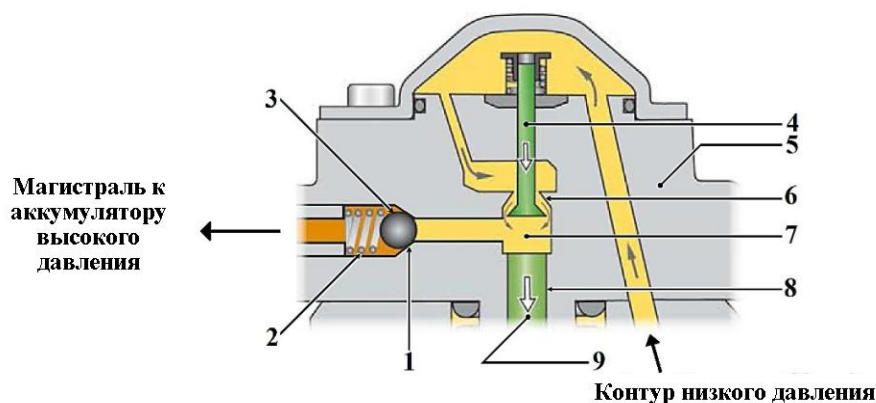


Рис. 2. Конструкция гидравлической головки в сборе с клапанами и плунжером [21]:
1 – седло выпускного клапана; 2 – пружина выпускного клапана;
3 – шар выпускного клапана; 4 – шток впускного клапана; 5 – корпус гидроголовки;
6 – седло впускного клапана; 7 – камера сжатия; 8 – отверстие плунжера; 9 – плунжер

Моделирование проводилось для двух случаев граничных условий: при открытом впускном клапане и открытом выпускном клапане. В первом случае абсолютное давление на входе составляло 600 кПа, а на выходе в систему – 430 кПа. Плунжер опускался со скоростью 3,47 м/с. При открытом выпускном клапане присутствуют два выхода: выход через выпускной клапан и выход через смазочный слой плунжерной пары. Давление на выходе выпускного клапана составляет 300 МПа, а на выходе смазочного слоя – 430 кПа. Плунжер движется вверх с той же скоростью. Температура в системе постоянна и эквивалентна 70 °С. Физические параметры рабочей жидкости (дизельного топлива) представлены в табл. 1. Схематичный вид граничных условий и сеточная модель изображены на рис. 3.

Таблица 1

Физические параметры дизельного топлива

Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Коэффициент динамической вязкости, Па·с
730	2090	0,149	0,0024

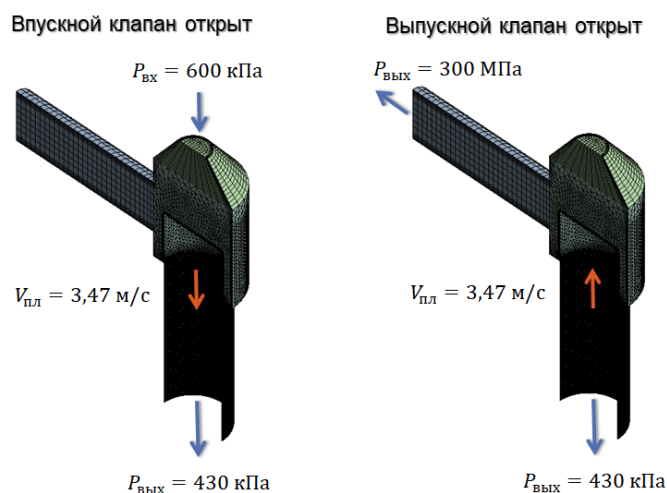


Рис. 3. Схематичный вид граничных условий и сеточная модель

Расчет и конструирование

Для определения влияния параметров микрогеометрии на гидродинамические характеристики трибосоприжения «втулка–плунжер» была выполнена серия опытов. Варьировались различные геометрические параметры микрогеометрии: радиус микроямок, глубина и плотность текстурирования. Вариант 10 был с гладкой поверхностью трения без особой топографии. Геометрические параметры микрогеометрии указаны в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические параметры микрогеометрии

Геометрические параметры	Варианты текстурирования									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Радиус, мкм	30	30	30	30	15	20	45	37,5	8	—
Глубина, мкм	30	30	30	10	5	20	45	37,5	8	
Количество микроямок	966	330	4018	966	966	966	966	966	966	
Плотность текстурирования, %	0,5	0,15	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

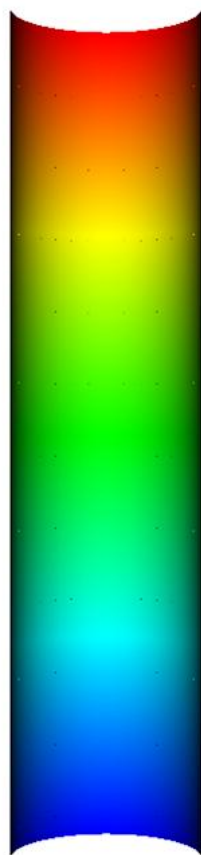
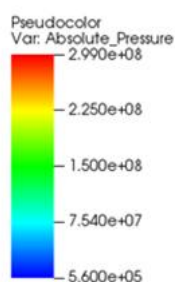


Рис. 4. Поле давлений в смазочном слое плунжерной пары

Положительного влияния текстурирования на гидромеханические характеристики плунжерной пары при открытии выпускного клапана не было выявлено.

2. Результаты моделирования

В результате моделирования были получены гидромеханические характеристики плунжерной пары: давление и потери на трение в смазочном слое. Потери на трение рассчитывались на основании полученных напряжений сдвига в смазочном слое. Поле давлений в смазочном слое при открытом выпускном клапане изображено на рис. 4. Поля давлений визуально не отличаются в зависимости от типа текстурирования, а отличаются лишь расчетными значениями. На рис. 5–6 представлены поля давлений и потери на трение в смазочном слое плунжерной пары при разных вариантах текстурирования.

Высокая плотность текстурирования негативно сказывается на гидромеханических характеристиках плунжерной пары. При открытии впускного клапана давление уменьшается на 55 %, а потери на трение возрастают на 0,6 %. При открытии выпускного клапана давление уменьшается на 49,3 %, а потери на трение возрастают на 24 %. Таким образом, вариант № 3 показывает наиболее худшие характеристики при открытом выпускном клапане по сравнению с другими вариантами.

Максимальное давление при открытии впускного клапана наблюдается при 9-м варианте текстурирования. По сравнению с гладким вариантом давление возрастает на 19,1 %, однако при этом потери на трение возрастают на 1,42 %.

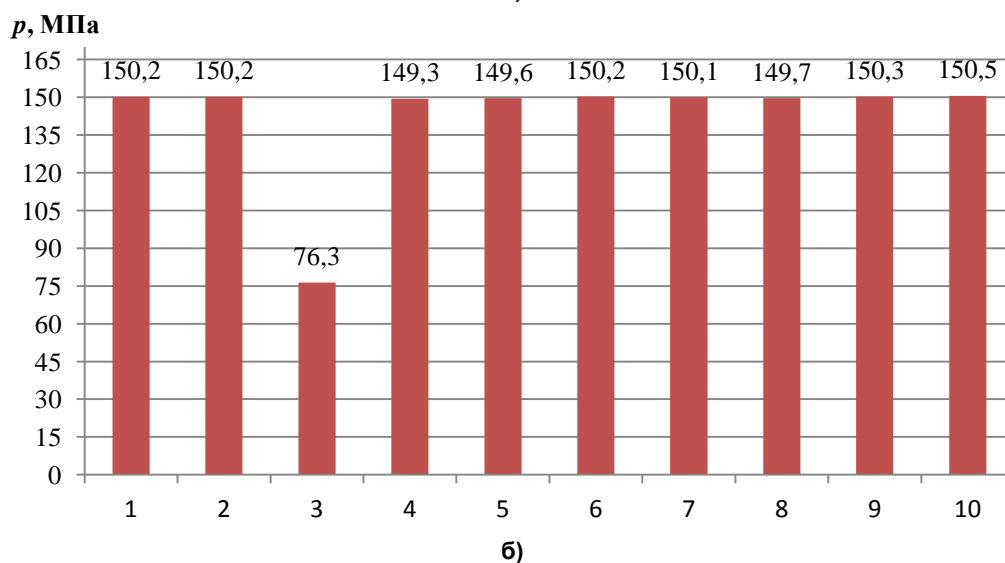
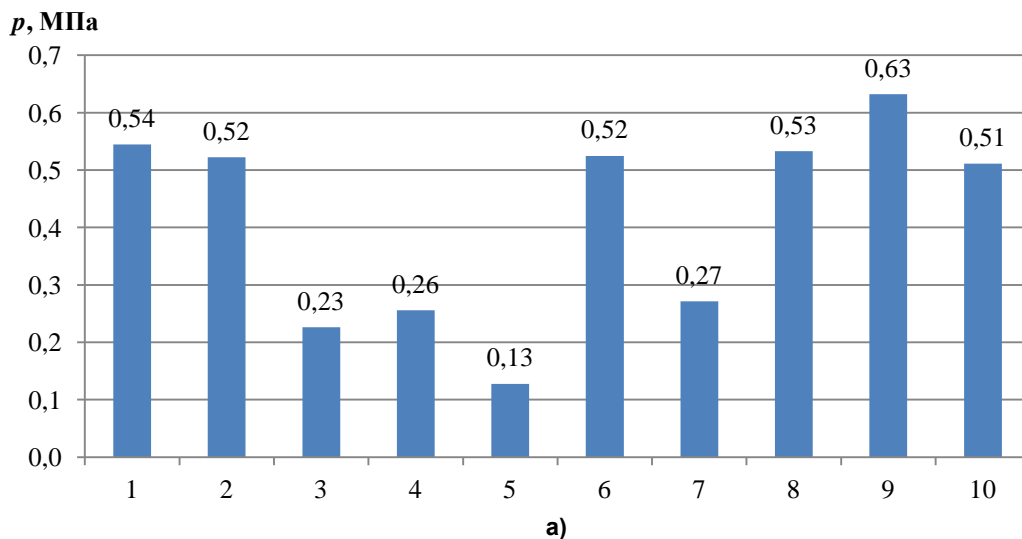


Рис. 5. Давление в смазочном слое плунжерной пары при разных вариантах текстурирования: а) давление при открытом впускном клапане, б) давление при открытом выпускном клапане

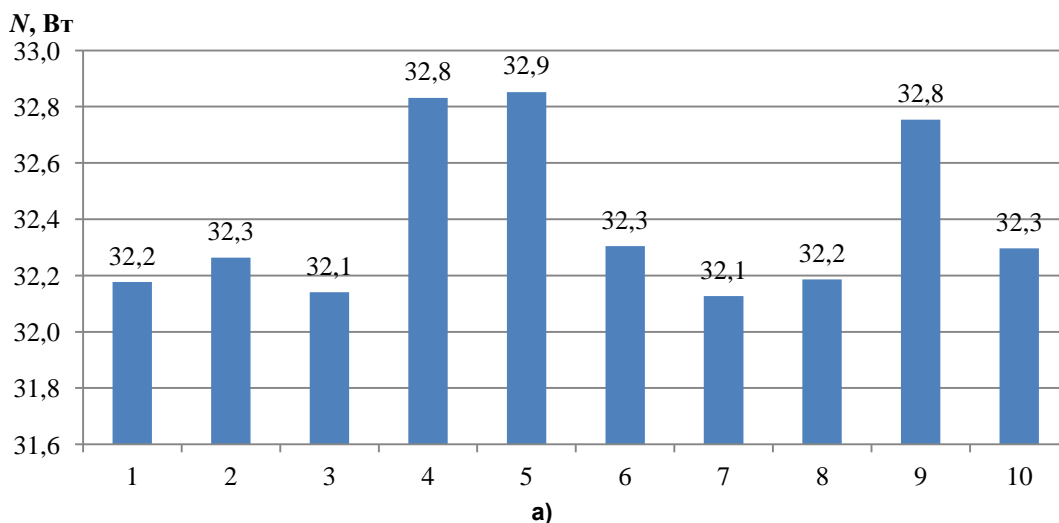


Рис. 6. Потери на трение в смазочном слое плунжерной пары при разных вариантах текстурирования: а) потери на трение при открытом впускном клапане, б) потери на трение при открытом выпускном клапане

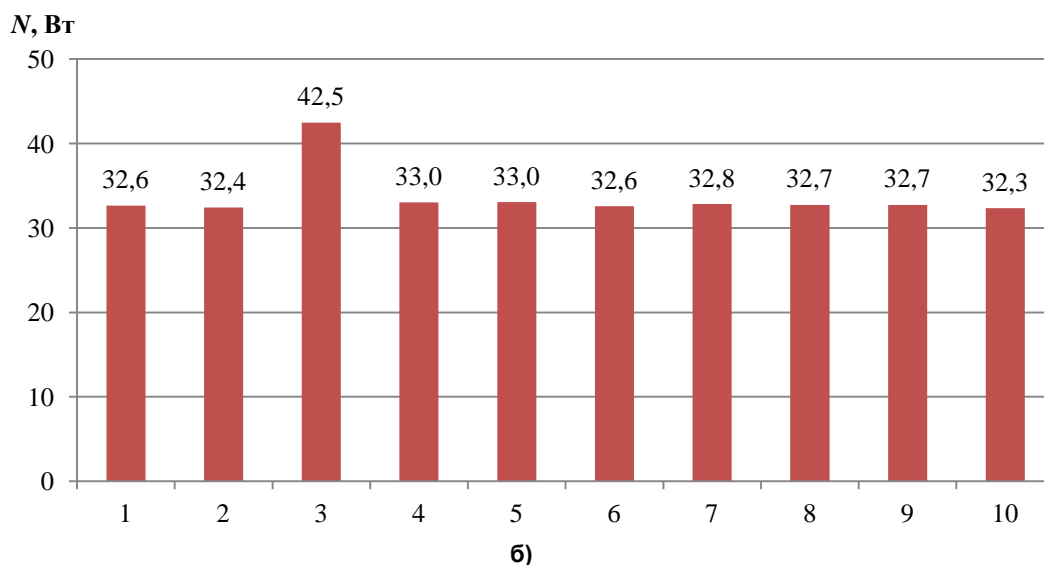


Рис. 6. Окончание

Заключение

В данной работе представлено параметрическое исследование влияния геометрических параметров микрогеометрии поверхности плунжера на его гидромеханические характеристики. Для моделирования гидродинамики использовался коммерческий программный комплекс ANSYS-Fluent. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Высокая плотность текстурирования негативно сказывается на гидромеханических характеристиках плунжерной пары. При плотности текстурирования 2 % давление в смазочном слое уменьшается на 49,3–55 %, а потери на трение возрастают на 0,6–24 % по сравнению с гладким вариантом поверхности плунжера.

2. При открытии впускного клапана максимальное давление наблюдается при 9-м варианте текстурирования. По сравнению с гладким вариантом давление возрастает на 19,1 %.

3. Положительного влияния текстурирования на гидромеханические характеристики плунжерной пары при открытии выпускного клапана не было выявлено.

Исходя из результатов исследования, можно сделать заключение о том, что применение текстурирования на поверхности плунжера ТНВД может оказывать как положительное, так и негативное влияние на его эксплуатационные характеристики. Поэтому подбор оптимальных геометрических характеристик микрогеометрии является определяющим фактором при эффективном использовании поверхностей с особой топографией в различных механизмах и машинах. В дальнейшем авторы планируют исследовать влияние формы микроямок на гидромеханические характеристики плунжерной пары, а также определить эффективность топографии при решении задач, связанных с динамикой плунжера.

Литература/References

1. Knauder C., Allmaier H., Sander D.E., Salhofer S., Reich F.M., Sams T. Analysis of the journal bearing friction losses in a heavy-duty diesel engine. *Lubricants*, 2015, no. 3, pp. 142–154.
2. Holmberg K., Andersson P., Nylund N.O., Mäkelä K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*, 2014, no. 78, pp. 94–114.
3. Zhang Q., Fu Y., Yuan Z., Song Z. Multi-medium running induced piston pump erosion. *Sci. Technol. Rev.*, 2012, no. 30, pp. 44–48.
4. Teoh Y.H., How H.G., Masjuki H.H., Nguyen H.-T., Kalam M.A., Alabdulkarem A. Investigation on particulate emissions and combustion characteristics of a common-rail diesel engine fuelled with Moringa oleifera biodiesel-diesel blends. *Renewable Energy*, 2019, vol. 136, pp. 521–534.
5. Huang J.L., Xu H., Sun S.Y., Wang D. Influence of fuel injection system's optimization on performance of diesel engine and its injection parameter reoptimization. *Journal of Dalian Maritime University*, 2017, vol. 43, no. 2, pp. 103–108.

6. Zhao J., Yongling F.U., Jiming M.A., Jian F.U., Qun C., Wang Y. Review of cylinder block/valve plate interface in axial piston pumps: theoretical models, experimental investigations, and optimal design. *Chinese Journals of Aeronautics*, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 111–134.
7. Segu D.Z., Hwang P. Effectiveness of multishape laser surface texturing in the reduction of friction under lubrication regime. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2016, vol. 68, no. 1, pp. 116–124.
8. Sun J., Zhang X., Zhu J., Gao Y., Wang H., Zhao X., Teng Q., Ren Y., Zhu G. On the lubrication characteristics of piston ring under different engine operation conditions. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, vol. 72, no. 1, pp. 101–108.
9. Cavallo M., Frattini E., Palmieri F. Fuel Influence on Single-Piston Common Rail Pump Performance. *SAE Technical Paper*, 2021, no. 2021-24-0063.
10. Chen L., Ren L. Q., Zhao Y., Zhou H. The wear-resistance of 3Cr2W8V steel with cave pit non-smooth processed by laser. *Journal of Bionic Engineering*, 2008, no. 5, pp. 34–39.
11. Lee Y.H., Schuh J.K., Ewoldt R.H., Allison J.T. Simultaneous design of non-Newtonian lubricant and surface texture using surrogate-based multiobjective optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, vol. 60, pp. 99–116.
12. Singh A., Patel D.S., Ramkumar J., Balani K. Single step laser surface texturing for enhancing contact angle and tribological properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 100, pp. 1253–1267.
13. Fukagai S., Le M., Lewis R. Tribological aspects to optimize traction coefficient during running-in period using surface texture. *Wear*, 2019, vol. 424, pp. 223–232.
14. Etsion I., Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*, 2009, vol. 42, pp. 542–547.
15. Kovalchenkova A., Ajayi O., Erdemir A., Fenskea G., Etsion I. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. *Tribology International*, 2005, vol. 38, pp. 219–225.
16. Etsion I., Halperin G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, pp. 430–434.
17. Etsion I., Kligerman Y., Halperin G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces. *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42, pp. 511–516.
18. Yin B., Zhou H., Xu B., Hekun J. The influence of roughness distribution characteristic on the lubrication performance of textured cylinder liners. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, vol. 71, no. 3, pp. 486–493.
19. Jia H., Zhou Z., Yin B., Zhou H., Xu B. Effect of compound texture on lubrication and sealing performance of plunger pump. *Lubrication Science*, 2020, vol. 33, pp. 43–59.
20. Jia H., Zhou Z., Yin B., Zhou H., Xu B. Influence of microdimple on lubrication performance of textured plunger pump. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2021, vol. 73, no. 4, pp. 563–571.
21. Iordache R.C., Petrea N.D., Bujoreanu C. Wear's issues on high-pressure common rail pumps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 724.

Гаврилов Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, gavrilovkv@susu.ru

Худяков Владислав Сергеевич, аспирант, кафедра «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, asp19kvs857@susu.ru

Умурзаков Ильдар Канымжанович, аспирант, кафедра «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, asp22uik733@susu.ru

Подвысоцкая Елена Александровна, инженер-исследователь, кафедра «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, podvysotckaiaea@susu.ru

Поступила в редакцию 17 ноября 2022 г.

**IMPROVEMENT OF THE PLUNGER PAIR
OF THE HIGH PRESSURE FUEL PUMP
FOR COMMON RAIL FUEL SUPPLY SYSTEMS***K.V. Gavrilov, gavrilovkv@susu.ru**V.S. Hudyakov, asp19kvs857@susu.ru**I.K. Umurzakov, asp22uik733@susu.ru**E.A. Podvysotckaya, podvysotckaiaaea@susu.ru**South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

Friction reduction is a key task of modern mechanical engineering. Friction reduction affects the efficiency, reliability, economy and ergonomics of various machines and mechanisms. One of the main causes of additional energy costs and malfunctions of mechanical systems is wear caused by friction processes. Most modern engines are equipped with Common Rail Fuel Injection for fuel economy, reduced emissions and high engine power. The high pressure fuel pump is one of the most important elements of the fuel injection system, the performance of which critically affects the performance of the entire fuel system. The fuel pump plunger is subjected to increased loads and its lubrication conditions are highly unstable under dynamic loading conditions, leading to increased and premature wear. The technology of laser surface microtexturing is actively used in the industrial sector, and its positive effect on reducing friction and improving anti-wear properties has been confirmed by theoretical and experimental studies. The purpose of this article is to evaluate the effect of texturing on the hydromechanical characteristics of a plunger pair in order to improve the energy efficiency of the fuel system of modern diesel engines. The calculations were carried out using the commercial software package ANSYS Fluent. Based on the results of the study, the use of texturing on the surface of the injection pump plunger can have both positive and negative effects on its performance. Therefore, the selection of the optimal geometric characteristics of microgeometry is a determining factor in the effective use of surfaces with special topography in various machines and mechanisms.

Keywords: plunger pair, high pressure fuel pump, friction losses, microgeometry, tribounits.

*Received 17 November 2022***ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Совершенствование плунжерной пары топливного насоса высокого давления для систем топливоподдачи COMMON RAIL / К.В. Гаврилов, В.С. Худяков, И.К. Умурзаков, Е.А. Подвысоцкая // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 5–12. DOI: 10.14529/engin220401

FOR CITATION

Gavrilov K.V., Hudyakov V.S., Umurzakov I.K., Podvysotckaya E.A. Improvement of the plunger pair of the high pressure fuel pump for COMMON RAIL fuel supply systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220401