

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ «ПОРШЕНЬ – ЦИЛИНДР» ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Дойкин

INVESTIGATION OF MATERIALS WEAR OF “PISTON – CYLINDER” TRIBOSYSTEM OF HEAVY LOADED DIESEL ENGINE

A.A. Doykin

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований износа материалов трибосопряжения «поршень – цилиндр» дизельного двигателя. Предложена гипотеза, объясняющая причины изменения профилей поверхностей трения при гидродинамическом режиме.

Ключевые слова: трибосопряжение «поршень – цилиндр», износ поверхностей трения, параметры шероховатости поверхности.

The technique and results of experimental research of materials wear of “piston – cylinder” tribosystem of diesel engine are presented. The hypothesis which explain the reasons of profiles change of friction surfaces at hydrodynamic mode is presented in this paper.

Keywords: “piston – cylinder” tribosystem, friction surfaces wear, surface roughness parameters.

Введение. В настоящее время в целях повышения маслосъемности сопряжения «поршень – цилиндр» применяется хонингование гильзы цилиндра. При хонинговании на гильзе цилиндра образуется сетка рисок, в результате чего, как принято считать, происходит надежное удержание смазки на трущихся поверхностях деталей, быстрее происходит их приработка, уменьшается износ деталей и увеличивается срок службы двигателя.

Несмотря на тот факт, что в процессе эксплуатации двигателя в сопряжении «поршень – цилиндр» устанавливается гидродинамический режим трения, на поверхности гильзы и поршня образуются натирывания в виде четких параллельных полос в направлении трения. При рассмотрении их в микроскоп видно, что они представляют собой канавки. Поверхность этих канавок имеет ровную мелкозернистую структуру, отсутствуют следы резания, задиров, растрескивания, пластических деформаций. Цель данной работы – выяснить причину их появления, а также определить линейную интегральную интенсивность изнашивания материалов пары трения «поршень – цилиндр» при смазывании различными маслами.

Методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились на машине трения СМЦ-2. Узел трения (рис. 1) для проведения экспериментальных исследований содержит диск 1, изготовленный из материала гильзы (легированный чугун) диаметром 90 мм и шириной 20 мм, установленный на нижний вал машины трения. На этот же вал установлена бронзовая втулка токосъемника 8 с полукруглой канавкой для струны 6. Колодка 2 изготовлена из материала поршня (алюминиевый сплав АК-4), имеет размер рабочей поверхности в плане 5 × 10 мм и закреплена в державке 3, которая электрически изолирована от корпуса машины трения. Нагрузка на колодку задается с помощью рычага (на схеме не показан) и устройства нагружения машины трения. Масло подается в зону трения с помощью капельницы, которая настраивается на расход 1 капля за 4–5 секунд. Королек термпары 5 зажат между тыльной стороной колодки и державки, что обеспечивает надлежащий тепловой контакт спая и колодки.

Расчет и конструирование

Снижение напряжения постоянного тока на контакте «диск – колодка» измерялось с целью определения факта металлического контакта поверхности диска и колодки. Нагрузочное сопротивление, равное 11,6 Ом, исключает перегрузку источника постоянного тока при возникновении металлического контакта. Колодка подключена к положительному контакту источника питания, чтобы минимизировать перенос металла и влияние постоянного тока на реальные характеристики слоя масла. Кроме того, цепь замыкается на короткий промежуток времени в момент замера напряжения.

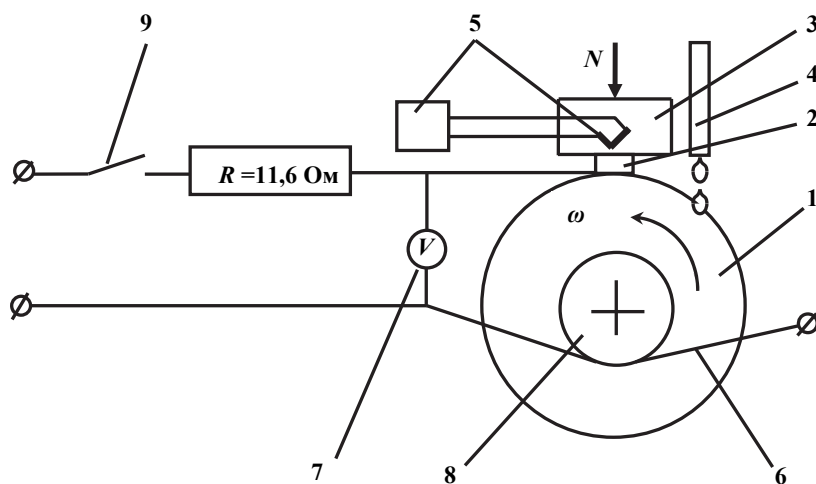


Рис. 1. Схема экспериментального узла трения:
1 – стальной диск; 2 – колодка; 3 – державка; 4 – капельница масла; 5 – термопара;
6 – струна токосъемника; 7 – вольтметр; 8 – токосъемник; 9 – выключатель

Момент трения измерялся датчиком момента машины трения и регистрировался на ленту самописца ПСР. Система измерений настроена на повышенную чувствительность.

Путь трения рассчитывался по известному числу оборотов, фиксируемому счетчиком оборотов вала машины трения. Исходя из предшествующего опыта авторов [1], путь трения, необходимый для достижения износа колодки, достаточного для измерения на имеющемся оборудовании, составляет 200 000 оборотов диска (56 000 м) и одинаков для всех экспериментов. Угловая скорость вращения диска поддерживалась постоянной и равной $104,6 \text{ с}^{-1}$, что соответствует максимальной линейной скорости поршня, равной 4,71 м/с. Нагрузка сдвливания колодки и диска подбиралась таким образом, чтобы обеспечить постоянное номинальное давление P_n , соответствующее максимальным давлениям в сопряжении и равное 4,6 МПа. Температура колодки поддерживалась в ходе испытаний на уровне рабочей температуры сопряжения, равной $140 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, с помощью вентилятора и инфракрасного нагревателя. Радиальное биение рабочей поверхности диска не превышало 0,01 мм и обеспечивалось проточкой диска, установленного на валу машины трения, с последующей шлифовкой.

Профилограммы поверхностей образцов снимались с помощью профилографа-профилометра АБРИС ПМ-7 в девяти точках по окружности диска и в одной точке колодки ввиду малости ее размеров. Параметры шероховатости гильзы и диска рассчитывались по известным методикам [2]. Начальная шероховатость диска (рис. 2) задавалась исходя из профилограммы (рис. 3), снятой с реальной гильзы цилиндра двигателя типа ЧН 13/15. Шероховатость наносилась по аналогии с гильзой, т. е. в перекрестных направлениях под углом $30\text{--}60^\circ$. Значения параметров шероховатости гильзы и диска до эксперимента (средние арифметические по трем экспериментам) приведены в табл. 1, из которой видно их качественное совпадение. После установки колодки и диска колодка притиралась к диску через шлифовальную шкурку М40 толщиной 0,15–0,16 мм, что обеспечивало радиальный установочный зазор, необходимый для подачи моторного масла в область трения.

Через каждые две тысячи оборотов диска фиксировалась температура колодки, момент трения и падение напряжения на масляном слое между колодкой и диском, для чего на короткое время подавалось напряжение постоянного тока. Результаты замеров вносились в протокол

испытаний. После испытаний полученные данные были обработаны и определен коэффициент трения и его среднеинтегральное значение f .

Масса колодки измерялась с точностью $5 \cdot 10^{-5}$ граммов до и после проведения эксперимента. Линейная интегральная интенсивность изнашивания рассчитывалась по формуле:

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A_a \cdot L}, \tag{1}$$

где $\Delta m = m_1 - m_2$ – изменение массы колодки в результате износа; ρ – плотность алюминиевого сплава АК-4; A_a – номинальная площадь контакта; L – путь трения.

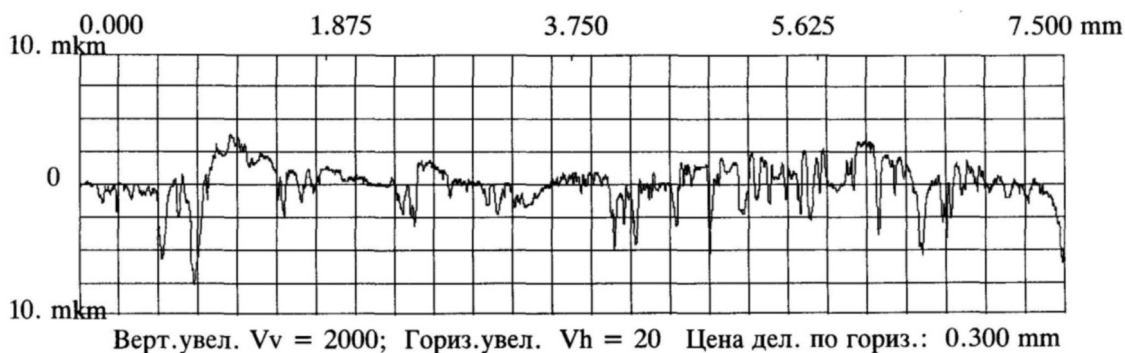


Рис. 2. Профилограмма поверхности диска до эксперимента

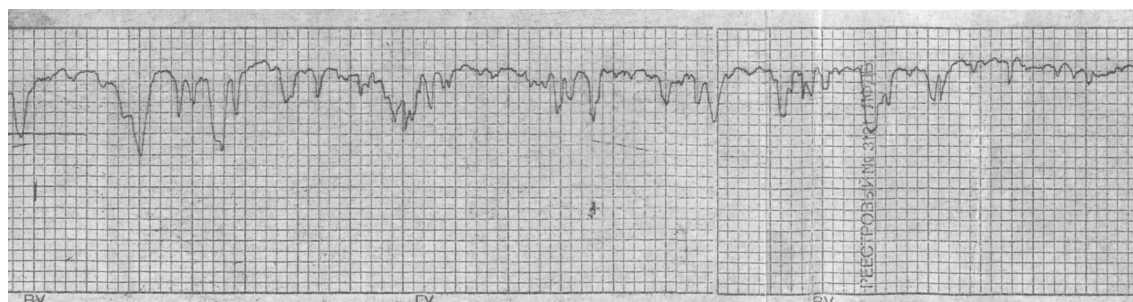


Рис. 3. Профилограмма поверхности гильзы после хонингования: вертикальное увеличение $V_v = 2000$; горизонтальное увеличение $V_h = 50$; цена деления: по горизонтали – 0,001 мм, по вертикали – 0,04 мм

Параметры шероховатости

Таблица 1

Параметр	Образец	
	Гильза	Диск
Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	1,37	1,16
Высота неровностей по десяти точкам R_z , мкм	9,75	7,12
Наибольшая высота профиля R_{max} , мкм	10,50	9,79
Среднее арифметическое значение шага микронеровностей S_m , мкм	101,52	86,83

Результаты экспериментов. Для испытаний выбраны три марки моторных масел из основных групп для дизельных двигателей тракторов и дорожно-строительной техники. Первая марка – М-10ДМ – из группы масел, изготавливаемых из сернистой нефти. Вторая – Shell Rimula R3X – из группы масел, содержащих присадки, устойчивые к термомеханическим воздействиям, главным образом алкилсалицилатные. Третья – Mobil Delvac XHP – из группы масел с пакетами диалкилдитиофосфатных присадок [3].

Для изучения влияния начальной обработки поверхности диска на параметры шероховатости проведены эксперименты под номерами 1 и 2 (табл. 2) на моторном масле М-10ДМ. Для изучения влияния свойств смазочного материала на параметры шероховатости были проведены эксперименты под номерами 3 и 4 на моторных маслах Shell Rimula R3 и Mobil Delvac XHP. В экспериментах № 1, 3 и 4 шероховатость поверхности диска наносилась описанным выше образом, в экспе-

Расчет и конструирование

рименте № 2 поверхность диска полировалась. Результаты экспериментов приведены в табл. 2. Снятые после экспериментов профилограммы диска и колодки приведены к одному масштабу и совмещены на рис. 4–7.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ эксп.	Марка масла	I_h	f	R_a , МКМ	R_z , МКМ	R_{max} , МКМ	S_m , МКМ
1	М-10ДМ	$2,248 \cdot 10^{-10}$	0,071	1,29*	6,67	9,68	125,77
				2,58**	17,04	21,28	78,52
2	М-10ДМ	$0,409 \cdot 10^{-10}$	0,136	0,22	2,16	4,10	39,44
				2,91	19,36	25,46	83,92
3	Shell Rimula R3X	$1,363 \cdot 10^{-10}$	0,108	0,93	6,69	9,09	65,46
				3,67	17,84	24,75	168,47
4	Mobil Delvac XHP	$3,788 \cdot 10^{-10}$	0,116	1,27	8,00	10,60	69,25
				2,61	17,55	25,25	86,48

Примечания: * – значение параметра до эксперимента; ** – значение параметра после эксперимента.

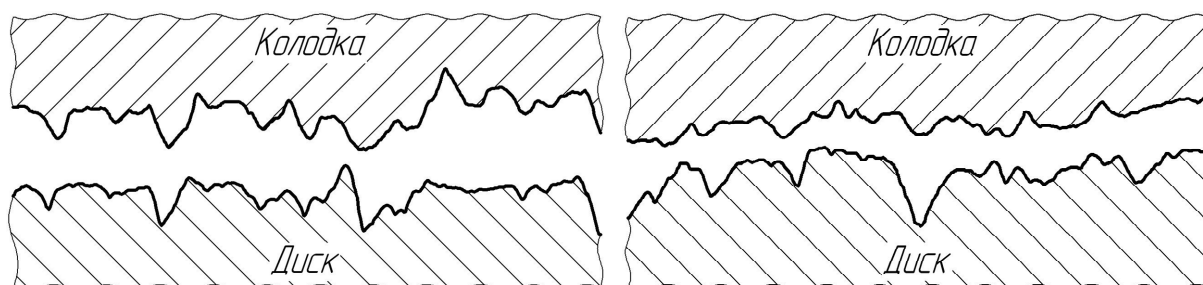


Рис. 4. Профилограммы диска и колодки после эксперимента № 1

Рис. 5. Профилограммы диска и колодки после эксперимента № 2

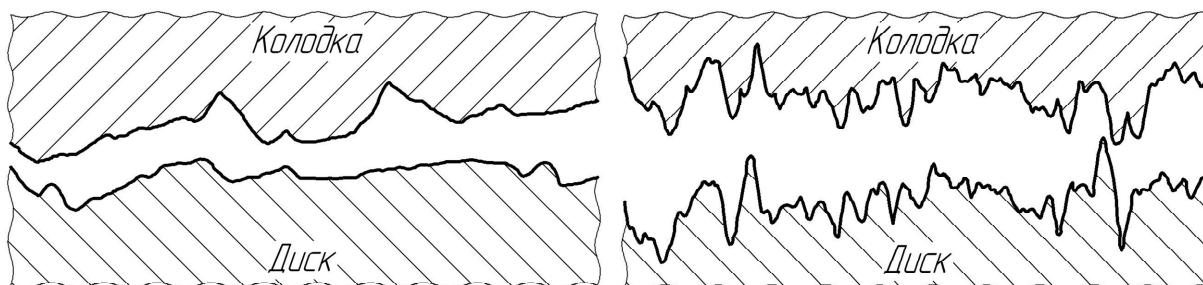


Рис. 6. Профилограммы диска и колодки после эксперимента № 3

Рис. 7. Профилограммы диска и колодки после эксперимента № 4

Как видно из рис. 4–7, независимо от начальной шероховатости приработанные поверхности диска и колодки комплементарны. Под комплементарностью поверхностей мы понимаем тот факт, что напротив выступа на поверхности диска находится впадина на поверхности колодки, а напротив впадины – соответствующий выступ. Для объяснения этого явления предложена следующая гипотеза. При движении выступа вблизи противоположной поверхности жидкость растекается в стороны, в результате вблизи этого выступа резко ускоряются массообменные процессы между пленкой масла и другой поверхностью. Так как масло имеет вязкость, данное возмущение распространяется на небольшое расстояние и быстро затухает. Наибольшая скорость перемещения жидкости развивается вблизи выступа, что обеспечивает повышение скорости окислительного процесса. Это приводит к появлению впадин на противоположной поверхности.

Выводы. В результате экспериментов обнаружено, что параметры равновесной шероховатости (R_a , R_z , R_{max} , S_m) не зависят от их начальных значений, но зависят от применяемого моторного масла. Поскольку во всех опытах отсутствовал металлический контакт между колодкой и диском, наиболее вероятной причиной появления поперечной шероховатости диска и колодки являются

окислительные и кавитационные явления в масляной пленке. Таким образом, различие в параметрах шероховатости объясняется разными окислительными и реологическими свойствами испытанных масел, обусловленными, в частности, вводимыми в них присадками.

Представленная работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00424).

Литература

1. Лазарев, В.Е. Интенсивность изнашивания антифрикционного слоя подшипников ДВС в условиях граничного трения / В.Е. Лазарев, Н.А. Усольцев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 18–22.
2. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 1: Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
3. Влияние вязкостно-температурных свойств моторных масел на гидромеханические характеристики трибосопряжения поршень – цилиндр / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, А.А. Дойкин, И.В. Мухортов // Двигателестроение. – 2010. – № 2. – С. 23–26.

Поступила в редакцию 3 февраля 2012 г.

Дойкин Алексей Алексеевич. Аспирант, инженер кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – гидродинамическая теория смазки, оптимизация трибосопряжения «поршень – цилиндр». Тел.: (351) 267-92-13; e-mail: kafat@susu.ac.ru

Aleksey A. Doykin. The post-graduate student, the engineer of “Motor transport and service of cars” department, South Ural state university. The area of scientific interests – the hydrodynamical theory of greasing, optimization of “piston – cylinder” tribosystem. Tel.: (351) 267-92-13; e-mail: kafat@susu.ac.ru