

УДК 621.891

DOI: 10.30987/article_5cb58f5110f645.31185545

С.Г. Бишутин

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ «COMMON RAIL» ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЕЁ ЗАВОЗДУШИВАНИИ

Выполнен анализ условий работы деталей пар трения топливной системы Bosch «Common Rail» 4-го поколения (CP4). Выявлены виды и особенности изнашивания, а также дефекты деталей пар трения топливной системы «Common Rail», обусловленные попаданием в неё воздуха. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по

повышению износостойкости деталей и недопущению завоздушивания рассмотренных топливных систем.

Ключевые слова: изнашивание деталей, дефекты деталей пар трения, топливная система «Common Rail», завоздушивание топливной системы.

S.G. Bishutin

PARTS WEAR PECULIARITIES OF “COMMON RAIL” FUEL SYSTEM IN DIESEL ENGINES AT ITS AIRING

The paper reports the analysis of wear peculiarities in parts of friction pairs of Bosch “Common Rail” fuel system of the fourth generation at the penetration of a large air amount in it (airing).

It is proved that the failure to keep a lubrication mode with fuel in moving joints of Bosch “Common Rail” (CP4) system at airing results in the friction surfaces contact with the formation of wear products as metal abrasive particles and all fuel system failure.

There is considered a device and the peculiarities in the operation of friction pairs of the fuel systems mentioned. Factors resulting in airing these systems in the course of operation, maintenance and repair of vehicles are emphasized.

It is defined that the parts of Bosch “Common Rail” CRDi fuel system with CP4.1 single plunger piston fuel pump of high pressure are subjected to the following wear types: cavitation, adhesion, corrosion-mechanical and abrasive wear.

A wear correlation of a plunger, a plunger tappet, a high-pressure fuel pump casing, and fuel nozzle valves is shown.

Main defects of friction pair parts caused by fuel system airing are revealed.

There are developed recommendations to avoid airing Bosch “Common Rail” fuel system of the fourth generation.

Key words: parts wear, friction pair defects, “Common Rail” fuel system, fuel system airing.

Введение

Развитие современного автомобилестроения связано с разработкой и внедрением новых топливных систем дизельных двигателей, позволяющих существенно повысить эффективность эксплуатации автотранспортных средств. К таким топливным системам можно отнести системы «Common Rail» 4-го поколения корпорации «Robert Bosch GmbH», обеспечивающие соответствие колесных транспортных средств пятому и шестому экологическим классам. Однако для обеспечения таких высоких экологических стандартов существенно повышаются требования к эксплуатации и техническому обслуживанию указанных топливных систем.

Нарушение правил эксплуатации транспортного средства, несвоевременное и некачественное техническое обслуживание топливной системы способны вызвать катастрофические виды изнашивания её деталей вследствие попадания воздуха в систему (завоздушивания), что приводит к отказу дизельного двигателя автомобиля и дорогостоящему ремонту. В современной научно-технической литературе отсутствуют научно обоснованные рекомендации по предотвращению таких отказов. Поэтому исследования в данном направлении являются актуальными.

Анализ условий работы деталей пар трения топливной системы Bosch «Common Rail» 4-го поколения

Рассмотрим устройство системы Bosch «Common Rail» 4-го поколения (рис. 1).

Данная система имеет две модификации топливного насоса высокого давления (ТНВД): CP4.1 - с одним плунжером и CP4.2 - с двумя плунжерами. В ней могут применяться пьезофорсунки или электромагнитные топливные форсунки (1) с возможностью работы при 2000 атм. В форсунках игла и корпус распылителя образуют прецизионную пару трения (зазор в сопряжении составляет несколько микрометров). Игла (2) совершает тысячи возвратно-поступательных движений в минуту, поэтому попадание каких-либо загрязнений с топливом в форсунку недопустимо.

ТНВД (3) предназначен для создания в топливной магистрали давления, необходимого для работы системы впрыска (форсунок). Привод насоса осуществляется через зубчатый ремень от коленчатого вала. С помощью двух кулачков, развёрнутых на приводном вале (4) на 180°, скачок давления топлива формируется синхронно с впрыском во время рабочего такта конкретного цилиндра. Для снижения трения при передаче усилия от приводных кулачков к плунжеру насоса между ними уста-

новлен ролик (5), соединенный с толкателем (6) плунжера (7). Толкатель плунжера, плунжер и соответствующие отверстия в корпусе (8) ТНВД образуют прецизионные пары трения, смазочным материалом которых является дизельное топливо. Топливный насос низкого давления (ТННД, 9) подаёт насосу высокого давления топливо в количестве, необходимом для каждого режима работы двигателя. Через дозирующий клапан (10) топливо попадает в область высокого давления. Управление клапаном осуществляется от блока управления двигателем. Кулачки приводного вала приводят плунжер (7) насоса в возвратно-поступательное движение. При возвратном движении плунжера объём камеры сжатия увеличивается. По этой причине давление в камере сжатия падает по сравнению с давлением топлива в корпусе насоса. Под действием этого перепада давления впускной клапан (11) открывается, и топливо затекает в камеру сжатия. После начала движения плунжера в прямом направлении давление в камере сжатия возрастает, и впускной клапан закрывается. Как только давление в камере сжатия превысит давление в топливной рампе, открывается выпускной (обратный) клапан (12), и топливо начинает поступать в рампу (13).

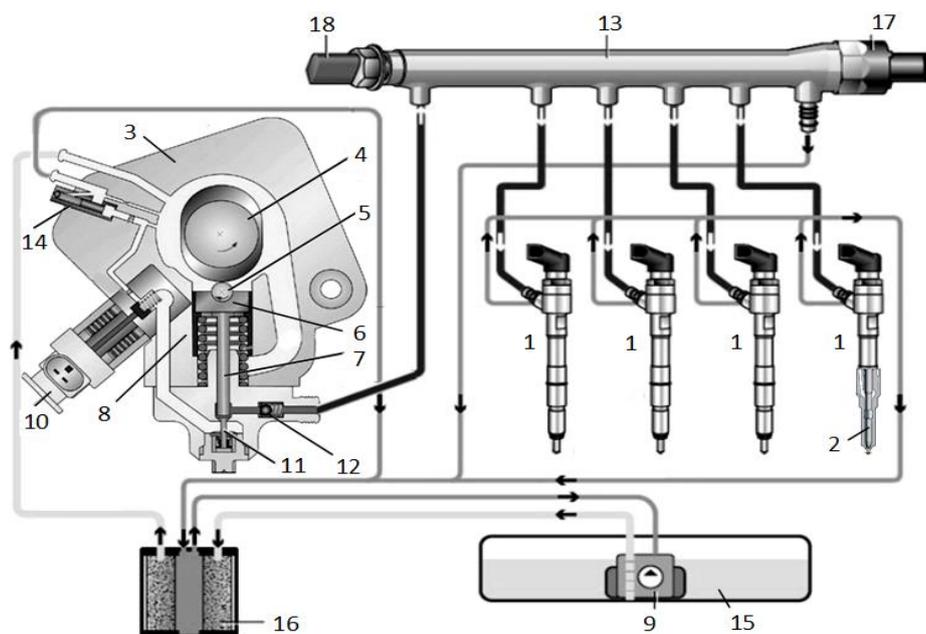


Рис. 1. Схема топливной системы Bosch «Common Rail» CP4.1 (стрелками показано направление движения топлива)

Давление топлива в магистрали низкого давления регулируется с помощью перепускного клапана (14), который расположен на входе в ТНВД. ТНВД подаёт топливо из топливного бака (15) через фильтр тонкой очистки (16) к ТНВД под давлением около 5 атм. Перепускной (редукционный) клапан удерживает давление топлива на входе в ТНВД на уровне 4,3 атм. Топливо, подаваемое ТНВД, давит на плунжер перепускного клапана, удерживаемого пружиной. Когда давление превышает 4,3 атм, перепускной клапан открывается, и топливо поступает в обратный топливопровод. Избыток топлива, таким образом, стекает обратно в топливный бак.

Для регулирования давления в рампе используется регулятор давления топлива (17), на котором имеется фильтр тонкой очистки в виде металлической сетки. Избыточное топливо через регулятор давления возвращается в обратный топливопро-

вод. На рампе имеется датчик давления топлива (18), который связан с электронным блоком управления двигателем.

Из проведенного анализа следует, что все пары трения системы Bosch «Common Rail» 4-го поколения смазываются дизельным топливом, содержащим противоизносные присадки. Нарушение режима смазывания топливом (например, при завоздушивании) приводит к контактированию поверхностей трения с образованием продуктов изнашивания в виде металлических частиц и выходу из строя всей топливной системы. Таким образом, необходимым условием долговременной работы пар трения данной топливной системы является недопущение попадания в неё существенных объемов воздуха (завоздушивания), приводящих к катастрофическим видам изнашивания деталей прецизионных пар трения.

Причины завоздушивания топливных систем «Common Rail» дизельных двигателей

Процесс попадания воздуха в топливную систему в большинстве случаев обусловлен следующими причинами:

1. Некачественное техническое обслуживание или ремонт топливной системы, приводящие к её разгерметизации. Разгерметизация вызывает постоянное попадание воздуха в топливную систему. Такое явление может произойти при замене топливного фильтра тонкой очистки, снятии и установке топливных форсунок, топливопроводов высокого давления, подаче дизельного топлива в систему питания двигателя из внешней ёмкости в ходе ремонтных работ.

Усугубляют последствия завоздушивания топливной системы работы по запуску двигателя с помощью стартера и применением средства облегчения запуска - аэрозольной смеси (эфира). При этом топливная система двигателя выходит из строя в течение нескольких часов.

2. Нарушение правил эксплуатации автотранспортного средства, обусловленное применением солярки, не соответствующей температуре окружающего автомобиля воздуха, и низким уровнем топлива в баке транспортного средства.

Наиболее опасна эксплуатация автомобиля с малым количеством летней со-

лярки в баке в условиях низких температур (ниже -15°C). Проанализируем, что произойдет в исследуемой топливной системе, в которой находится летнее дизельное топливо объемом 8-10 л, при температуре ниже -15°C .

Обычно температура застывания летнего дизельного топлива составляет от -10 до -15°C [1; 2]. При более низкой температуре такое дизельное топливо полностью теряет свою подвижность из-за кристаллизации углеводородов, что приводит к прекращению подачи топлива к двигателю. Это вызывает остановку двигателя и невозможность его последующего запуска.

При уровне топлива в топливном баке около 8-10 л в топливо погружен не весь топливный насос низкого давления, расположенный в топливном баке, а только его приемный фильтр.

При движении автомобиля с таким объемом топлива при интенсивном ускорении (торможении), на подъемах (спусках) или участках дороги с поперечным уклоном воздух может засасываться насосом в топливную магистраль низкого давления, что недопустимо для топливной системы Bosch «Common Rail» CP4 из-за возможности ее завоздушивания и последующего отказа двигателя.

После остановки прогретого двигателя дизельное топливо остается в топливной системе при условии её герметичности. При этом температура топлива в топливопроводах низкого давления в рассматриваемых условиях составляет $+10...+20$ °С [3-5]. Длина топливопровода низкого давления в автомобиле составляет около 5 м. При охлаждении топлива, например до -20 °С, его объем уменьшается [1; 2] и давление в топливопроводе существенно падает. Это приводит к формированию в нем воздушных пробок вследствие попадания воздуха через топливный насос низкого давления, который, как было указано ранее, полностью не погружен в топливо и окружен воздухом, а также выделения из дизельного топлива растворенного в нём воздуха [2].

Так как температурный коэффициент объемного расширения летнего дизельного топлива равен около $0,001$ °С⁻¹ и изменение коэффициента растворимости воздуха

в топливе составит $0,01$ м³/м³ [2], то при охлаждении солянки на 30 °С (от $+10$ до -20 °С) в 5-метровом топливопроводе общая длина воздушных пробок составит $0,001 \cdot 30 \cdot 5 + 0,01 \cdot 5 = 0,2$ м.

Парафиновые пробки в застывшем дизельном топливе, а также образовавшиеся в нем воздушные пробки препятствуют запуску дизельного двигателя, оборудованного топливной системой Bosch «Common Rail» CR4.

Следует отметить, что парафиновые пробки в застывшем дизельном топливе растворяются при его нагреве выше температуры застывания топлива и работоспособность системы восстанавливается [3-5], однако для удаления воздушных пробок требуются дополнительные работы по развоздушиванию (прокачиванию) топливной системы. В противном случае детали рассматриваемой топливной системы получают критические дефекты, и она полностью выходит из строя.

Особенности изнашивания и дефекты деталей пар трения топливной системы «Common Rail», обусловленные её завоздушиванием

Представленные ниже результаты были получены в ходе автотехнических экспертиз автомобилей марок «Киа» и «Хёндай», оборудованных топливной системой Bosch «Common Rail» CRDi с одноплунжерным топливным насосом высокого давления CR4.1.

Попадание воздуха в исследуемую топливную систему двигателя (завоздушивание) вызывает кавитационное изнашивание металлической сетки (показана стрелками) фильтра регулятора давления топливной рампы (рис. 2, 3).



Рис. 2. Регулятор давления топливной рампы



Рис. 3. Фильтр регулятора давления топливной рампы

Такой вид изнашивания наблюдается при наличии пузырьков воздуха в потоке жидкости (в дизельном топливе) [6; 7]. При прохождении такой жидкости через

регулятор давления топливной рампы воздушные пузырьки смыкаются («схлопываются») и металлические поверхности подвергаются гидравлическим ударам, ко-

которые приводят к образованию на них повреждений в виде характерных углублений и язв (рис. 4). При этом на фильтре регулятора давления топливной рампы обнаруживаются частицы металла (продукты изнашивания деталей ТНВД вследствие попадания воздуха), которые застряли в нем при прохождении загрязненного дизельного топлива (рис. 5). Регулятор давления с указанными дефектами подлежит замене.

Завоздушивание топливной системы Bosch «Common Rail» не допускается, поскольку приводит к отказу топливного насоса высокого давления вследствие ускоренного изнашивания его деталей, при этом продукты изнашивания загрязняют всю топливную систему.

После разборки топливного насоса высокого давления в ходе визуального осмотра его деталей были обнаружены повреждения (дефекты) в виде царапин и натиров на плунжере (рис. 6), толкателе плунжера (рис. 7, 8), на кулачке приводного вала ТНВД (рис. 9), в отверстии корпуса ТНВД под толкатель плунжера (рис. 10, 11).

Выявленные дефекты формируются при контактировании друг с другом металлических деталей насоса из-за отсутствия смазочного материала (дизельного топлива) вследствие попадания воздуха в топливную систему, то есть имеет место адгезионное изнашивание деталей ТНВД. ТНВД с такими дефектами необходимо заменить.

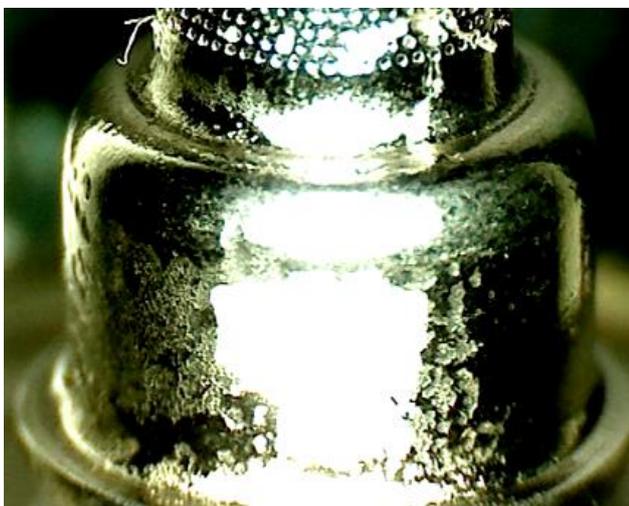


Рис. 4. Следы кавитационного изнашивания фильтра регулятора давления топливной рампы

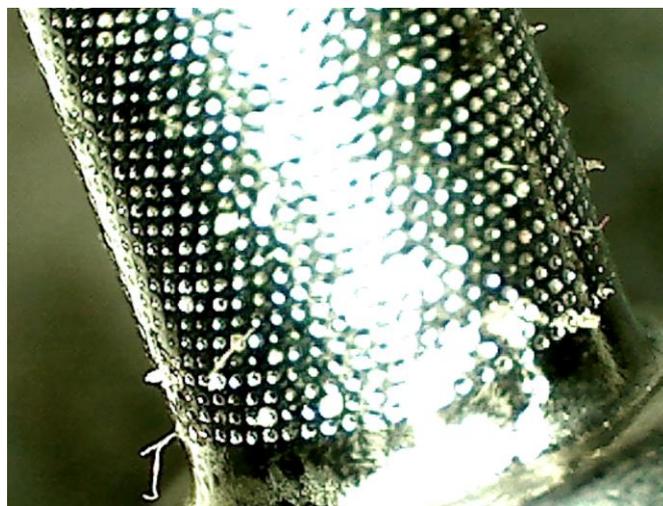


Рис. 5. Продукты изнашивания деталей ТНВД, застрявшие в сетке фильтра регулятора давления

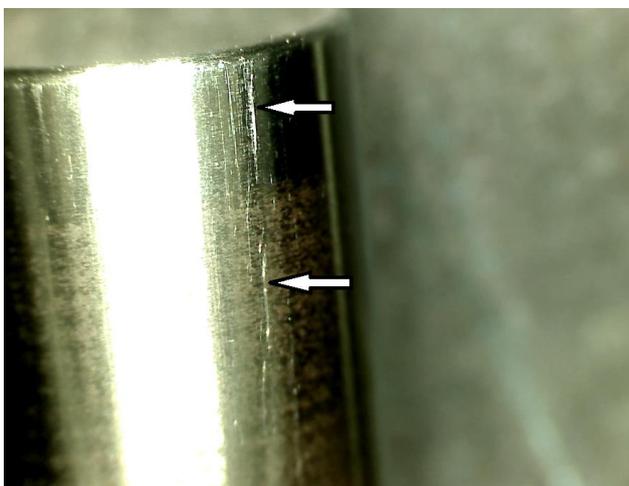


Рис. 6. Повреждения плунжера ТНВД

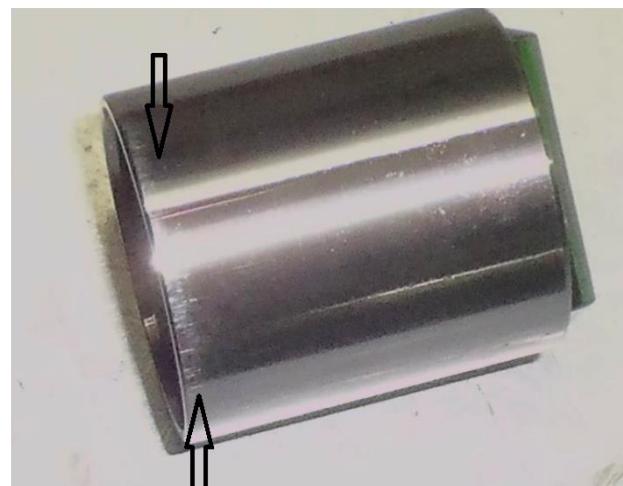


Рис. 7. Толкатель плунжера ТНВД с дефектами

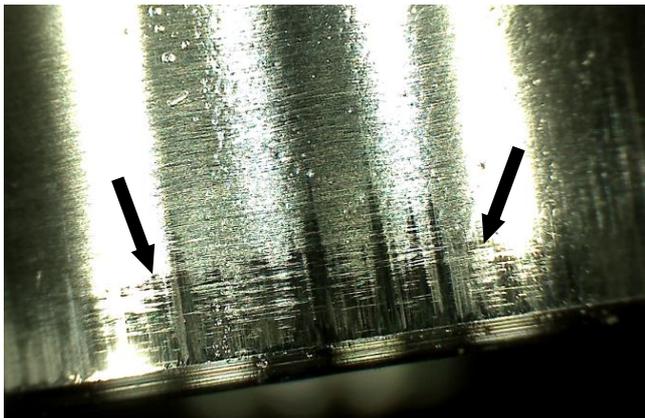


Рис. 8. Натирь на наружной цилиндрической поверхности толкателя плунжера ТНВД

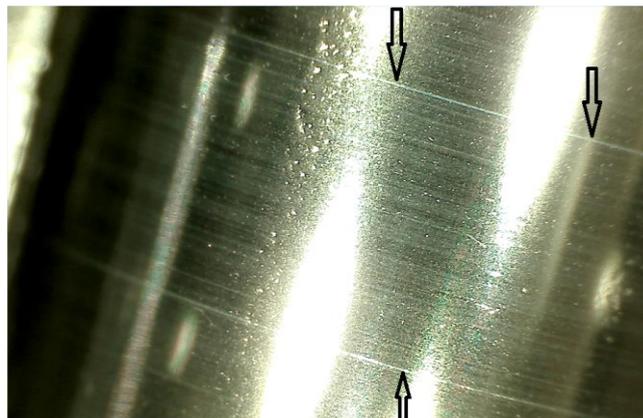


Рис. 9. Царапины на кулачке приводного вала ТНВД

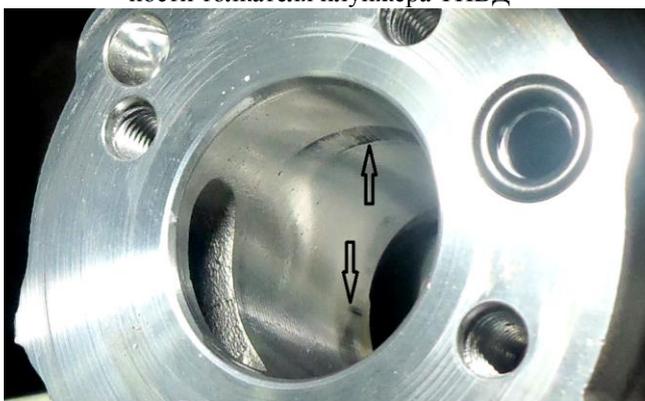


Рис. 10. Натирь в отверстии под толкатель плунжера корпуса ТНВД

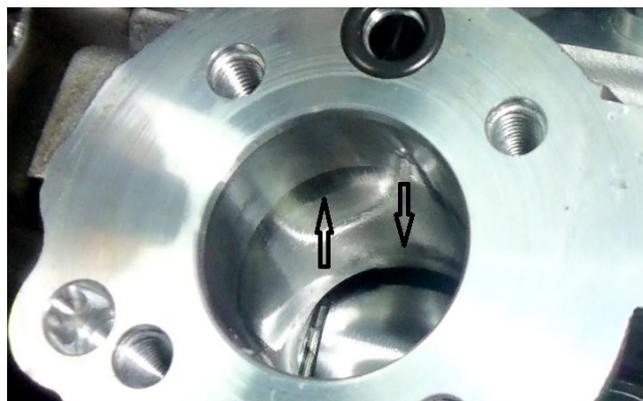


Рис. 11. Следы изнашивания в отверстии под толкатель плунжера корпуса ТНВД

Повреждение толкателя плунжера в ходе контактирования с алюминиевым (менее твердым) корпусом ТНВД объясняется образованием на поверхности трения оксида алюминия (Al_2O_3) в ходе коррозионно-механического изнашивания. Такой оксид существенно тверже стали, из которой изготовлен толкатель [8-10], и он активно образуется при попадании воздуха в топливную систему.

Образовавшиеся продукты изнашивания деталей ТНВД и абразивные частицы оксида алюминия, попавшие вместе с топ-

ливом в топливопроводы высокого давления и далее к форсункам, повреждают иглы топливных форсунок. Этот факт подтверждается исследованием цилиндрических поверхностей иглы разуконплектованной электромагнитной форсунки (рис. 12). На рис. 13 видны расположенные перпендикулярно друг к другу следы финишной механической обработки иглы и царапины от попадавших внутрь форсунки продуктов изнашивания деталей ТНВД. Часто наблюдается заклинивание игл форсунок из-за изнашивания деталей ТНВД.



Рис. 12. Игла электромагнитной форсунки

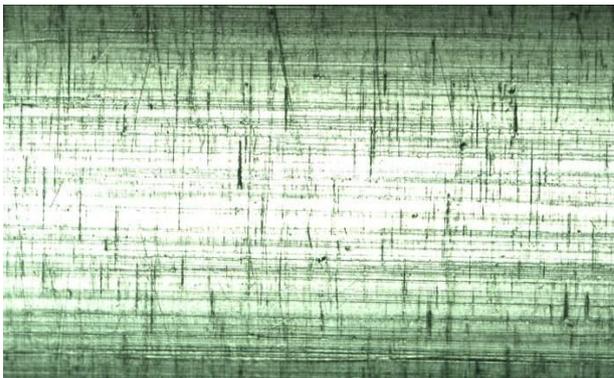


Рис. 13. Наружная цилиндрическая поверхность иглы форсунки с дефектами

Так как работа неисправных форсунок в системах Bosch «Common Rail» последних поколений блокируется ограничителями (аварийными клапанами) подачи топлива при заклинивании игл в открытом состоянии или при завоздушивании внутреннего пространства форсунок, это также не позволяет запустить двигатель.

Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно утверждать следующее:

1. Нарушение режима смазывания топливом подвижных сопряжений системы Bosch «Common Rail» при завоздушивании приводит к контактированию поверхностей трения с образованием продуктов изнашивания в виде металлических и абразивных частиц и выходу из строя всей топливной системы.

2. При завоздушивании топливной системы происходит кавитационное изнашивание фильтра регулятора давления топливной рампы, адгезионное и коррозионно-механическое изнашивание плунжера, толкателя плунжера и корпуса топливного насоса высокого давления. Поверхности указанных деталей получают дефекты в виде углублений, язв, царапин и натиров.

3. Продукты изнашивания деталей топливного насоса высокого давления вызывают абразивное изнашивание поверхностей трения форсунок и их заклинива-

Таким образом, адгезионное и коррозионно-механическое изнашивание деталей ТНВД вследствие завоздушивания приводит к абразивному изнашиванию поверхностей трения форсунок и в конечном итоге к отказу дизельного двигателя.

ние. На поверхностях трения игл форсунок формируются риски и царапины, не совпадающие со следами финишной абразивной обработки.

4. После замены топливного фильтра тонкой очистки и каких-либо ремонтных работ для удаления воздушных пробок необходимо проводить дополнительные работы по развоздушиванию (прокачиванию) системы Bosch «Common Rail» CP4.

5. Не следует допускать применения дизельного топлива, не соответствующего температуре окружающего автомобиль воздуха, и низкого (менее $\frac{1}{4}$) уровня топлива в баке транспортного средства.

6. Проводить работы по техническому обслуживанию и ремонту топливной системы Bosch «Common Rail» 4-го поколения следует только в сервисных центрах, имеющих соответствующий допуск корпорации «Robert Bosch GmbH» к работе с указанными системами и необходимое технологическое оборудование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко, Н.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы / Н.Б. Кириченко. – М.: Академия, 2012. – 208 с.
2. Дубовкин, Н.Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства топлив / Н.Ф. Дубовкин [и др.]. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
3. Габитов, И.И. Техническое обслуживание и диагностика топливной аппаратуры автотракторных дизелей / И.И. Габитов, Л.В. Грехов, А.В. Неговора. – Уфа: БГАУ, 2008. – 240 с.
4. Грехов, Л.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливopодpаждущих систем дизелей / Л.В. Грехов. – М.: Легион-Автодата, 2013. – 292 с.
5. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением / Л.В. Грехов. – М.: Легион-Автодата, 2009. – 176 с.
6. Морозов, Г.П. Кавитационный износ деталей гидроагрегатов / Г.П. Морозов // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 56-61.
7. Цветков, Ю.Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю.Н. Цветков. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 155 с.
8. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
9. Чукин, Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций / Г.Д. Чукин. – М.: Принта, 2010. – 288 с.
10. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов / С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.

1. Kirichenko, N.B. *Vehicle Operation Materials* / N.B. Kirichenko. – М.: Academy, 2012. – pp. 208.
2. Dubovkin, N.F. *Physical-Chemical and Operation Properties of Fuel* / N.F. Dubovkin [et al.]. – М.: Chemistry, 1985. – pp. 240.
3. Gabitov, I.I. *Maintenance Works and Diagnostics of Fuel Equipment of Vehicle and Tractor Diesel Engines* / I.I. Gabitov, L.V. Grekhov, A.V. Negovora. – Ufa: BSAU, 2008. – pp. 240.
4. Grekhov, L.V. *Design, Computation and Maintenance Works of Diesel Fuel Systems* / L.V. Grekhov. – М.: Legion-Autodata, 2013. – pp. 292.
5. Grekhov, L.V. *Fuel Equipment of Diesel Engines with Electronic Control* / L.V. Grekhov. – М.: Legion-Autodata, 2009. – pp. 176.
6. Morozov, G.P. Cavitation wear of hydraulic unit parts / G.P. Morozov // *World of Transport*. – 2013. – No.2. – pp. 56-61.
7. Tsvetkov, Yu.N. *Cavitation Wear of Metal and Equipment* / Yu.N. Tsvetkov. – S-Pb.: S-PbSPU Publishers, 2003. – pp. 155.
8. Myshkin, N.K. *Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Tribology Engineering Applications* / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – М.: Physmathlit, 2007. – pp. 368.
9. Chukin, G.D. *Structure of Aluminum Oxide and Catalysts of Hydro-desulfurization. Reaction Mechanisms* / G.D. Chukin. – М.: Printa, 2010. – pp. 288.
10. Bishutin, S.G. *Wear-Resistance of Machinery and Mechanisms* / S.G. Bishutin, A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 112.

Статья поступила в редакцию 23.01.19

Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного государственного университета

Агеев Е.В.

Статья принята к публикации 22. 03. 19.

Сведения об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: nad-bisch@yandex.ru.

Bishutin Sergey Gennadievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Vehicle", Bryansk State Technical University, e-mail: nad-bisch@yandex.ru.