

УДК 620.184.4:623.43.038

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ
ИГЛА–КОРПУС РАСПЫЛИТЕЛЯ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО, канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ,
канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ, В.В. КОСТРИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлена технология ремонта форсунок дизельных двигателей. Рассмотрена конструкция форсунки, выделены наиболее ремонтпригодные части из изнашиваемых. Определено, что деталями форсунки, которые и разрушаются в первую очередь, и определяют работоспособность форсунки в целом, являются игла и корпус распылителя. Рассмотрены процессы, вызывающие изнашивание этих деталей форсунки. Замечено, что суммарный износ трибопары запорного конуса иглы форсунки и корпуса распылителя составляет 0,16–0,31 мкм, что приводит к увеличению подачи топлива на 3–7%. Предложенная технология восстановления работоспособности форсунки включает в себя операции разборки форсунки и очистки ее деталей, дефектовку деталей, операции нанесения покрытий и восстановления корпуса, механическую обработку, операции сборки и тестирования. Подробно рассмотрены рекомендации по восстановлению исходных размеров и механических свойств поверхностей иглы форсунки дизельного двигателя с учетом различных классов сталей. Испытания работоспособности восстановленных по данной технологии форсунок показали, что интенсивность износа восстановленных игл в отремонтированных форсунках имеет достаточно приемлемые для ее эксплуатации значения.

Ключевые слова: форсунка, отказ, распылитель, плунжер, износ, ремонт-восстановление, кавитация, трибосопряжение.

Введение. В последнее время во многих источниках, в т.ч. связанных с важными международными экономическими форумами, рассматриваются проблемы деградации окружающей среды и изменений климата, вызванные деятельностью человека. Обсуждаются вопросы важности продления сроков службы исчерпавших свой ресурс агрегатов, которые используются человеком. В [1; 3; 4] отмечена необходимость развития стратегий, отдающих предпочтение ремонтируемым изделиям. В связи с этим разработки технологий восстановления размеров и несущих способностей поверхностей деталей машин являются важными научно-техническими задачами, направленными в т.ч. на решение экологических проблем. При этом экономическую эффективность следует искать в сохранении экологических ресурсов планеты в целом.

Форсунки дизельных двигателей, по сути, являются ремонтируемыми изделиями. Из-за неправильно подобранного материала трибопар, неадекватной термообработки, некачественного топлива, содержащего повышенное количество серы и иные примеси, нередки случаи отказов отдельных конструктивных элементов форсунок и, как следствие, отказ всего двигателя [1–9]. Форсунку заменяют на новую, старую при этом отправляют в утиль. Однако часто работоспособность детали форсунки можно восстановить, и отремонтированная форсунка может прослужить срок, сравнимый со сроком службы новой форсунки. При этом расходы материалов, необходимых для такого типа ремонта, и его экологические последствия являются несравнимо более низкими, чем расходы на производство новой форсунки.

Детали, проблемы с которыми наиболее часто приводят к отказу форсунки дизельного двигателя, – игла и корпус распылителя; седло и шток клапана управления. Их интенсивное изнашивание наблюдается вследствие попадания абразивных частиц либо продуктов изнашивания в топливо или наличия процессов кавитационного изнашивания в присутствии большого перепада давления в камере сгорания двигателя. Все перечисленные процессы обуславливают как механическую составляющую изнашивания посредством микроцарапания твердыми частицами, присутствующими в топливе, так и кавитационные процессы, возникающие в процессе циклического прохождения топлива через отверстия в корпусе распылителя [2–9].

Цель работы – разработка технологии восстановления деталей соединения игла–корпус распылителя, исходных размеров и несущей способности поверхностей изношенной иглы форсунки дизельного двигателя.

Методы и материалы исследования. За основу исследования были приняты наконечники распылителей пьезоэлектрических и механических форсунок дизельных двигателей производства компаний BOSCH, DLLA Japan, DLLA Germani. Фотографирование и оценка геометрических параметров объектов проводились на комплексе Nikon EpiPhot 200BD; микротвердость структурных составляющих измеряли на установке Identamet 1106; химический состав материала определяли при помощи оптико-эмиссионного спектрометра Spectro Port PXC01; процесс имитации изнашивания образцов проводили на машине трения MMW-1A. Идентификация химических элементов осуществлялась при помощи программ Fe-40-MO, Fe-15-MO. Интерпретация марки материала – экспертным анализом. Нанесение покрытий – на установке «Булат-4 ТО».

Анализ условий эксплуатации. Дизельная форсунка работает в тяжелых условиях. Например, при частоте вращения выходного вала двигателя с механической системой впрыска 2000 об/мин игла распылителя

поднимается и садится на свое посадочное место 17 раз в секунду [10]. В силу конструктивных особенностей форсунки требуют к себе особого внимания и отношения, что порой затруднительно, учитывая место расположения форсунок и параметры их рабочей среды. Для соответствия их заявленных рабочих параметров эксплуатационным форсунки необходимо периодически проверять и обслуживать. Периодичность обслуживания дизельных форсунок колеблется для различных двигателей и в среднем составляет 100 тыс. км пробега.

Отказ форсунок приводит к некорректной работе дизельного двигателя автомобиля, о чем могут свидетельствовать следующие признаки [4; 9]:

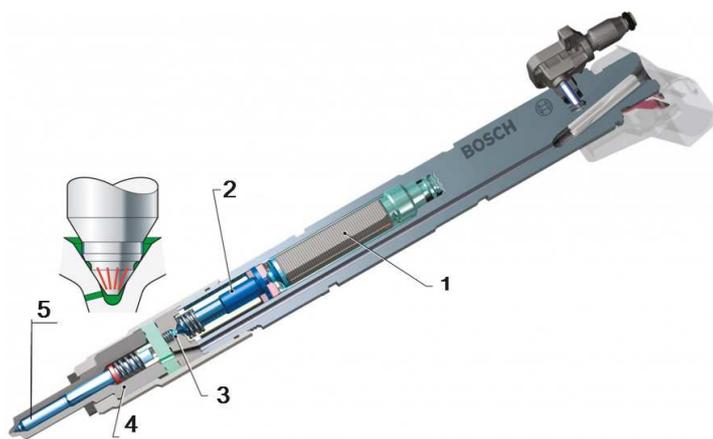
- появление белого дыма на холостом ходу либо черного при нагрузке, который сопровождается стуком в двигателе;
- потеря мощности двигателя при повышении нагрузки;
- повышение температуры отработавших газов;
- при увеличении нагрузки появляются рывки и провалы в работе двигателя;
- ухудшение запуска двигателя или двигатель вообще не запускается с помощью стартера;
- на холостых оборотах работа двигателя становится неустойчивой.

При наличии перечисленных признаков проводят компьютерное диагностирование системы питания. Если она показывает замыкание электрической цепи на форсунках, перебои в работе цилиндров, изменение цикловой подачи какой-либо из форсунок, то необходимо проверить в первую очередь техническое состояние топливных форсунок [4; 5; 9]. Отбраковка форсунок идет по целому перечню отказов и несоответствий (таблица 1), т.к. они все оказывают существенное влияние на работу двигателя. Неисправные форсунки, как правило, заменяют [2].

Таблица 1. – Возможный перечень дефектов форсунок дизельных двигателей и последствия для работы двигателя в целом

Дефекты	Причина	Возможные последствия
Выход из строя распылителя	распылитель теряет возможность удерживать топливо	появляется светлый дым на холостом ходу, который при нагрузке исчезает
Выход из строя иглы распылителя	игла теряет подвижность в закрытом положении	появляется черный дым при нагрузке, сопровождаемый стуком; автомобиль неравномерно работает на холостом ходу (данный дефект ощущается при небольших значениях давления в системе)

Конструкцию форсунки можно условно разделить на три части: управляющую, гидравлическую и исполнительную (рисунок 1) [9].



1 – пьезоэлектрический соленоид; 2 – промежуточный толкатель; 3 – клапан управления;
4 – корпус распылителя; 5 – игла распылителя [3]

Рисунок 1. – Конструкция форсунки с пьезоэлектрическим приводом фирмы BOSCH

В верхней части форсунки дизельного двигателя находится управляющий элемент, в средней – гидравлический цилиндр и клапан управления, в нижней расположены плунжер и распылитель [4; 9]. Сам распылитель состоит из двух частей: корпуса и иглы.

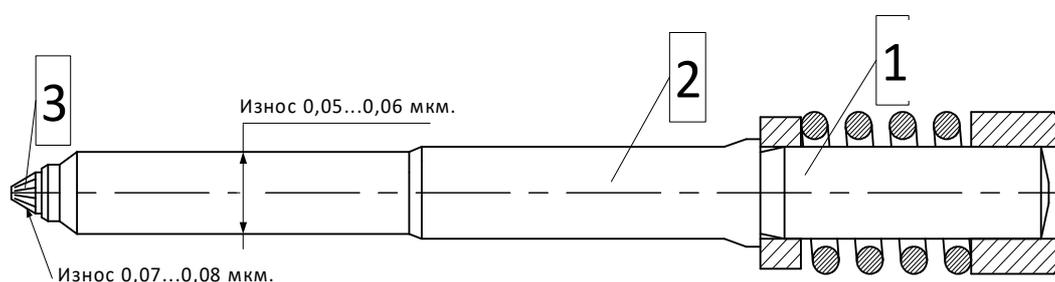
Результаты исследований. В существующих на данный момент литературных источниках особенностям ремонта форсунок дизельных двигателей уделяется недостаточное внимание, с нашей точки зрения.

В статье будут рассмотрены вопросы разработки технологии восстановления работоспособности исчерпавших свой ресурс деталей.

Основными деталями форсунки, которые подвержены отказам в первую очередь, являются игла и корпус распылителя [6–8]. Поскольку техническое состояние этих деталей непосредственно определяет работоспособность форсунок (а значит, и технико-экономические, и экологические показатели работы двигателя в целом), то вопросы контроля и восстановления технических параметров этих деталей имеют чрезвычайно важное значение.

В процессе эксплуатации рабочие поверхности распылителей форсунок подвергаются воздействию как разогретых цилиндрических газов, так и высоких значений рабочего давления топлива (характерных для систем Common Rail). Вследствие этих воздействий корпус распылителя получает тепловые и механические деформации, сопровождающиеся искривлением вертикальной оси. Запорный конус изнашивается, увеличивается ход иглы, что приводит к прорыву газов в полости распылителя, его закоксовыванию, сужению рабочих отверстий распылителя и уменьшению количества работающих отверстий.

Рассмотрим конструкцию иглы (рисунок 2) и выделим в ней наиболее ремонтпригодные части. В игле разные поверхности имеют различный износ, поскольку условия работы у каждой части сильно разнятся [12].



1 – верхняя прецизионная часть; 2 – направляющая часть; 3 – запорный конус

Рисунок 2. – Игла распылителя с величинами износа

Верхняя прецизионная часть 1 изнашивается вследствие циклического механического воздействия колец пружины с одной стороны и гидромеханического воздействия топлива. Величина износа, как правило, составляет 0,001–0,005 мм. В результате такого изнашивания цилиндрическая поверхность приобретает коническую вогнутую форму [4; 6; 12]. А износ седла иглы приводит к изменению положения в отверстии корпуса распылителя и нарушению геометрических параметров выхода топлива, что влияет на регулировочные параметры выходного факела.

В направляющей части 2 износ выражен менее всего, поскольку на эту часть воздействует только гидромеханическая составляющая топливного потока [6; 12]. При длительной эксплуатации форсунок установлены неравномерные износы направляющей части поверхности корпуса распылителя и поверхности иглы, а также уплотнительных конусов иглы. В нижней части направляющей кроме гидромеханического изнашивания появляются напряжения, связанные с осевыми нагрузками от механического воздействия и, одновременно, уменьшением зазоров между корпусом и иглой. В результате нарушается плотное прилегание иглы, что приводит к повышенному износу этой части, вызывающему нечеткую отсечку подачи топлива, протекание сопла и в последующем его закоксовывание.

В запорном конусе 3 и прилегающей части изнашивание идет вследствие гидромеханического воздействия топлива, периодических кавитационных воздействий и пластического деформирования тела иглы из-за частых взаимодействий с корпусом распылителя [4; 12].

Наиболее целесообразно восстанавливать именно поверхности запорного конуса 3 и направляющей части 2.

Рассмотрим процессы, вызывающие изнашивание поверхностей иглы. На запорный конус действует постоянная нагрузка со стороны пружины. Металл под действием совокупных нагрузок подвергается поверхностному упрочнению [12]. Поверхность его уплотняется и приобретает ориентацию по оси иглы; в металле наблюдаются усталостные явления, а при температурных рабочих воздействиях (300–500 °С) явления релаксации. Под воздействием циклических нагрузок на поверхности могут образовываться микротрещины и деформационные напряжения. При этом на состояние рабочей поверхности большое влияние оказывают кавитационные процессы.

Процессам кавитационного износа посвящен ряд работ [14; 15]. Однако особенности процесса применительно к данным условиям можно описать следующим образом: при прохождении потока топлива по узкому каналу – зазору между корпусом распылителя и иглой – его скорость возрастает. При этом скорость будет возрастать до тех пор, пока давление в системе подачи топлива не снизится вследствие открытия отверстий распыления. При этом резкий перепад давления в сторону снижения заставляет остатки жидкости в корпусе распыли-

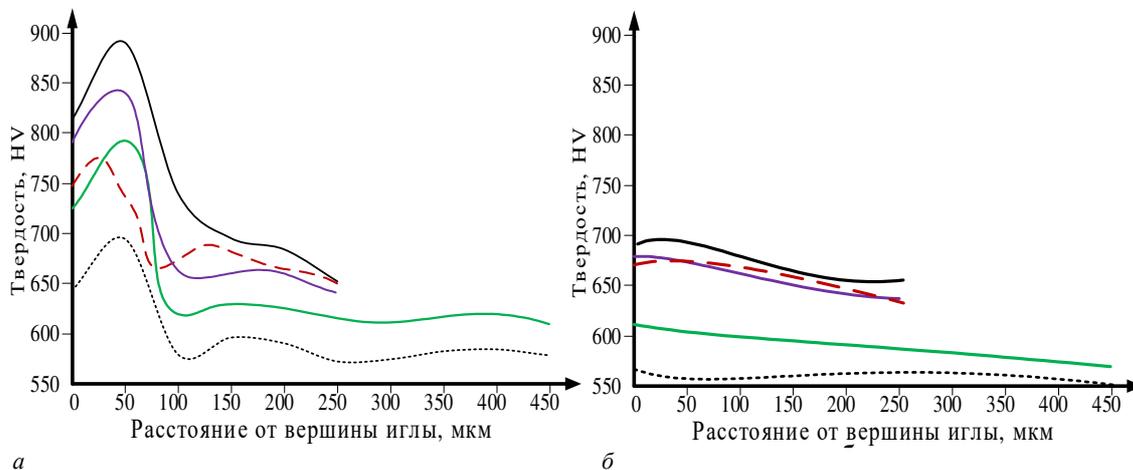
теля вскипать, выделяя пузырьки. Таким образом, максимальная скорость зависит от давления на входе ramпы, создаваемого топливным насосом высокого давления. Когда жидкость покидает форсунку, скорость снижается, а давление наоборот начинает расти. Кипение жидкости прекращается, паровые пузырьки взрываются – в этом случае на запорный конус будут действовать процессы кавитации плюс температурные деформации, а также знакопеременное осевое давление [12].

В действительности давление, при котором начинается кавитация, существенно зависит от физического состояния жидкости. В нашем случае жидкость содержит большое количество растворенного воздуха, поскольку при транспортировке и доставке топлива к потребителю топливо подвергается перекачке несколько раз через трубы разного диаметра. И в конечном пункте выдачи топливо поступает в систему питания автомобиля через заправочный пистолет, который при заправке создает турбулентный поток, насыщаемый большим количеством воздуха.

Однако при прохождении топлива по системе питания автомобиля происходит уменьшение давления, которое приводит к выделению воздуха из жидкости и образованию газовых полостей, в которых давление выше, чем давление насыщенных паров жидкости. При наличии в жидкости микропузырьков кавитационные явления могут возникать при давлениях, превышающих давление насыщенного пара. Из-за кавитации, а также высокой скорости потока жидкость оказывает сильное механическое действие на корпус и иглу распылителя, что наряду с загрязненностью топлива твердыми частицами и продуктами механического износа вызывает повышенное изнашивание как прецизионной части иглы, так и запорного корпуса распылителя. Причем износ запорного конуса существенно больше износа направляющей поверхности.

Вместе с тем в моменты кавитационного воздействия топливо вместе с абразивом вырывает отдельные частицы и упрочняет поверхность иглы [12]. Также упрочнение происходит в момент жесткого соприкосновения иглы с корпусом распылителя. При этом на иглу действуют как осевые, так и тангенциальные силы, что еще больше упрочняет поверхность запорного конуса. Об этом косвенно может свидетельствовать повышение твердости иглы вследствие локального наклепа.

Отсутствие пиковых значений твердости после восстановления, с нашей точки зрения, связано с процессами рекристаллизации и снятия внутренних напряжений, проходящих при нанесении покрытий. Выравнивание значений твердости после обработки также может косвенно свидетельствовать о возможных явлениях наклепа при длительной эксплуатации. При этом наиболее ярко явления выражены на расстоянии до 100 мкм от запорного конуса (рисунок 3).



а – до восстановления; *б* – восстановленные

Рисунок 3. – Изменение твердости иглы в зависимости от расстояния от вершины

При длительной эксплуатации внешние поверхности, прилегающие к запорному конусу, подвергаются деформации под влиянием ряда факторов: осевого давления пружины, ударного воздействия запорного конуса и действия потока топлива. На расстоянии до 50 мкм вследствие искривления продольной оси и воздействия ударных нагрузок наблюдаются явления наклепа, о чем косвенно свидетельствует рост твердости на исследуемых образцах. При восстановлении иглы проходили явления рекристаллизации и снятия накопившихся напряжений. Пиковые значения на поверхностях иглы отсутствовали.

Под воздействием вышеуказанных явлений поверхность запорного конуса иглы изнашивается неравномерно: большие значения износа (0,07–0,08 мм) наблюдаются в средней части, меньшие (0,055–0,06 мм) – в нижней. Это объясняется наличием в средней части помимо кавитационного воздействия еще и циклических упругих деформаций, способствующих микродеформированию верхней части форсунки [2; 6; 12]. Износ запор-

ной части нарушает герметичность посадки иглы, в результате чего газы из камеры сгорания прорываются внутрь распылителя, что способствует с одной стороны локальному повышению давления в этой части, с другой – большому искажению вертикальной оси иглы как от дополнительного нагрева, так и от увеличившегося давления в момент удара о корпус распылителя. Эти явления ведут к деформации запорной части иглы и могут привести к закоксовыванию отверстий корпуса с внутренней стороны, а затем, при уменьшении общего диаметра отверстия, к началу закоксовывания и с внешней стороны распылителя.

Суммарный износ трибопары запорного конуса и корпуса распылителя составляет по разным данным 0,16–0,31 мкм [12], что приводит к увеличению подачи топлива на 3–7%.

На запорном конусе иглы (рисунок 4) напротив распылительных отверстий часто обнаруживается либо выгорание, либо истирание металла. Из-за этого распылитель будет выдавать увеличенные дозы топлива в момент, когда выгоревшие участки на игле окажутся напротив отверстий, что негативно сказывается на работе двигателя [2; 4; 6; 12].



Рисунок 4. – Следы истирания и выгорания металла на игле распылителя

Анализ способов восстановления работоспособности трибосопряжения плунжер–корпус показал принципиальные различия в подходах к восстановительным технологиям для иглы и корпуса.

При рассмотрении возможностей восстановления корпуса изначально необходимо очистить распылительные отверстия от нагара. Для этого на первом этапе проводится разрыхление нагарных масс путем нагрева корпуса выше 70 °С с последующим помещением детали в ультразвуковую ванну с жидкостью, имеющей повышенную проникающую способность. Затем рекомендуется продувка с последующей промывкой корпуса. Промывку следует производить жидкостью под большим давлением.

Наиболее перспективным является восстановление геометрических параметров иглы и подгонка их характеристик под индивидуальные посадки в корпус распылителя. На рисунке 5 показана предлагаемая схема технологии ремонта соединения игла–корпус форсунки дизельного двигателя с восстановлением исходных размеров и несущей способности поверхностей изношенных игл.

На первой стадии следует разобрать форсунку, произвести чистку ультразвуком в ванне с применением средства с повышенной проникающей способностью. Вторая стадия заключается в дефектации составляющих деталей форсунки и замера линейного износа рабочих поверхностей. Кроме того, здесь же производится сортировка деталей по группам для возможного дальнейшего восстановления. На третьем этапе необходима более глубокая очистка.

Четвертая стадия – наиболее ответственная – восстановительная операция. Поверхности восстанавливаются методом нанесения определенных для каждой марки стали покрытий с учетом дальнейшей обработки. После нанесения покрытий следуют операция контроля их качества, обработка восстановленных поверхностей, затем ряд операций обработки рабочих поверхности под исполнительные размеры. После механической обработки проводят еще одну контрольную операцию. Здесь контролируют линейные размеры деталей, которые должны быть равны необходимым исполнительным. Последними следуют операции притирки. Используя селективную сборку, окончательно собирают форсунку и проверяют ее работоспособность.

Рассмотрим особенности проведения четвертой операции (нанесение покрытий) на примере восстановления механических характеристик и исходных размеров игл. Для производства игл используется целый ряд возможных материалов, для которых необходимо использовать разные технологии восстановления. В таблице 2 приведены рекомендации к восстановлению исходных размеров и механических свойств игл из сталей различного типа.

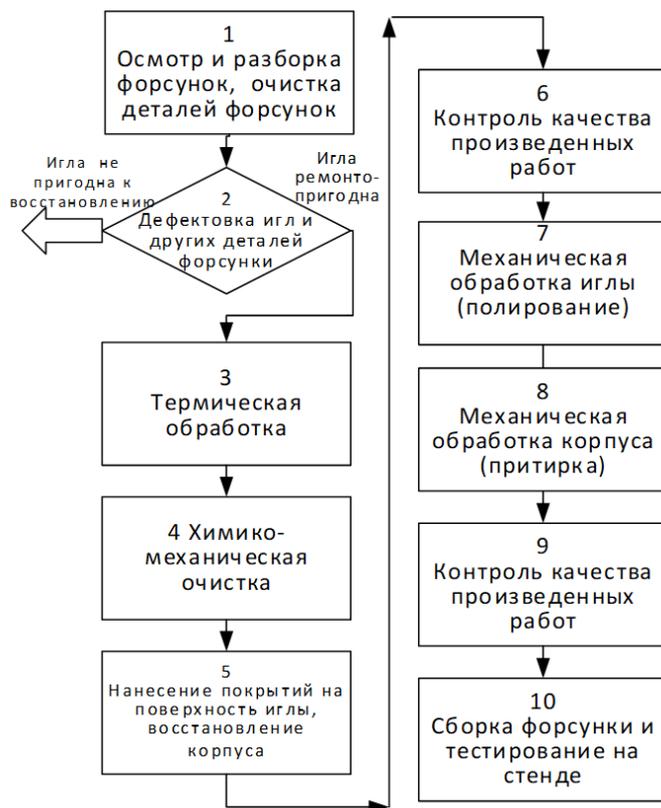


Рисунок 5. – Схема технологии ремонта форсунки дизельного двигателя

Таблица 2. – Рекомендуемые методы восстановления исходных размеров и механических свойств поверхностей из различных классов сталей

Материал, класс, представитель	ВКН	Азотирование	Гальваника	Лазерная модификация	ФАБО	Электроискровое легирование	Физико-механические характеристики
P9	+	+	+/-	+	+/-	+	1
	+	+	+/-	+	-	+	2
	+	+	?	+	-	+	3
	+	-	+	+/-	+/-	+/-	4
18X2H3A	+	-	+/-	+	+/-	+	1
	+	-	+/-	+	-	+	2
	+	-	+	+	?	+	3
	+	-	+	+/-	-	+/-	4
ХВГ	+	+/-	+/-	+	+/-	?	1
	+	+/-	+/-	+	-	+	2
	+	+/-	+	+	?	+	3
	+	-	+	+/-	-	+/-	4

Примечание: 1 – повышение износостойкости; 2 – повышение твердости; 3 – работоспособность при повышенных температурах; 4 – возможность восстановления размеров, формы; ? – необходимы дополнительные исследования; + – уверенно «Да»; +/- – проблематично; -- – уверенно «Нет».

Для восстановления поверхностей игл из сталей типа P9 необходимо использовать азотирование в сочетании с лазерным модифицированием рабочих поверхностей. По литературным данным неплохие результаты для данного класса сталей отмечаются для вакуумно-конденсационного напыления (ВКН) с применением установки типа «Булат». Рекомендуемым материалом для покрытий может служить нитрид титана.

Для восстановления поверхностей игл из сталей типа 18X2H3A целесообразны цементация с последующей закалкой при изготовлении детали и при проведении восстановительных работ с применением селективной сборки использование ВКН. При применении ремонтных технологий для восстановления размеров и получения поверхностной твердости порядка 55–60 HRC рекомендуется применения гальванотехнологий, в частности нанесения твердого хрома. Достаточные показатели для данного класса материалов получены при применении технологии финишной антифрикционной безабразивной обработке (ФАБО) с нанесением латунного покрытия [13]. Также зарекомендовало электроискровое нанесение материала, однако при его применении возникали некото-

рые трудности с применением оснастки для сохранения неподвижной горизонтальной оси иглы, поскольку геометрические размеры детали не предусматривают протяженных технологических баз.

Износ рабочей поверхности запорного конуса и поверхности направляющей незначительный, поэтому можно применять процессы восстановления, связанные с образованием дополнительных упрочняющих фаз. Наилучшие результаты выявлены при азотировании материала. При этом в выявленной зоне упрочнения материала наличие нитридов, входящих в составе эвтектик, способствует как приработке трибосопряжения, так и минимальным показателям износа при режиме установившегося износа. Данный эффект объясняется тем, что азотирование материала проходит при температурах 560–580 °С. В зоне выявленного поверхностного наклепа происходит снятие скопившихся напряжений и рекристаллизация структуры материала поверхностного слоя. Таким образом, указанные явления и наличие нитридов в поверхностном слое, показывающих наибольшую стойкость при рабочих температурах 500–600 °С, могут объяснить минимальные значения износа трибопары при такой технологии восстановления.

Стали класса ХВГ рекомендуется подвергать как ВКН, так и лазерному модифицированию с последующим полированием сопрягаемых поверхностей.

После восстановительных операций необходима механическая обработка. В одном случае это будет шлифование/полирование, в случае с нанесением минимальной толщины материала должна быть предусмотрена притирка деталей. После механической обработки для каждой трибопары следует предусмотреть прецизионную сборку.

В различных литературных источниках указаны различные параметры износа деталей, восстановленных данными методами [13; 16]. Однако, с нашей точки зрения, следует рассматривать не износ отдельной детали, сколько бы он ни был мал, а износ трибосопряжения в целом. Для трибопар в данных условиях эксплуатации это обширное поле исследовательской деятельности.

Заключение. Отмечена важность развития стратегий, отдающих предпочтение ремонтуемым изделиям. Замечено, что в существующих на данный момент литературных источниках особенностям ремонта форсунок дизельных двигателей уделялось недостаточно внимания, хотя данный элемент дизельного двигателя вполне ремонтпригоден. При рассмотрении конструкции форсунки выделены наиболее ремонтпригодные детали из изнашиваемых. Основными деталями форсунки, которые и разрушаются в первую очередь, и определяют работоспособность форсунки в целом, являются игла и корпус распылителя. Проанализированы процессы, вызывающие изнашивание поверхностей этих деталей. Замечено, что суммарный износ трибопары запорного конуса иглы форсунки и корпуса распылителя составляет от 0,16–0,31 мкм. Это приводит к увеличению подачи топлива на 3–7%, что негативно влияет как на экономические факторы, связанные с вопросами эксплуатации машины, так и на окружающую среду.

Для увеличения срока эксплуатации трибосопряжения плунжер–игла–корпус можно использовать технологические приемы восстановления линейных размеров и физико-эксплуатационных параметров деталей, входящих в сопряжение. При анализе способов восстановления работоспособности трибосопряжения плунжер–корпус–игла пришли к выводам о принципиальном различии в подходах к восстановительным технологиям для иглы и корпуса. Предложены технологии восстановления работоспособности форсунки, включающие операции разборки форсунки и чистки ее деталей, дефектовку деталей, термохимико-механическую обработку игл и корпусов форсунки, операции нанесения покрытий и ремонта корпуса, механическую обработку восстановленных поверхностей, операции контроля качества, сборки и тестирования. Приведены рекомендации по восстановлению исходных размеров и механических свойств поверхностей иглы форсунки дизельного двигателя с учетом различных классов сталей.

Восстановление иглы распылителя зависит от марки материала и состояния рабочих поверхностей на момент ремонта.

Для материала типа 18Х2Н3А наилучшие результаты получены при применении азотирования и методов ВКН. Это объясняется максимальной стойкостью нитридов при рабочих температурах 500–6000 °С и их способностью к подстройке к структуре материала сопряженной детали, что может быть связано с наличием малоизнашивающегося нитрида титана в поверхностном слое. Он создает локальные очаги с достаточной твердостью, и при этом его толщина позволяет материалу основы выступать в роле демпфера. Таким образом, на поверхности получаем структуры Шарпи II рода, что положительно сказывается на износостойкости трибосопряжения в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schwab, К.М. COVID-19: The Great Reset / К.М. Schwab, Т. Malleret // 2020 World Economic Forum. Forum publishing. – 2020 – 212 p.
2. Трелин, А.А. Основные показатели технического состояния форсунок – давление начала впрыска, качество распыливания топлива, герметичность и пропускная способность / А.А. Трелин, К.В. Трелина // Тр. ГОСНИТИ. – 2007. – Т. 99. – С. 61–63.
3. Piezo-Injektoren [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.audi-technology-portal.de/de/antrieb/tdi-motoren/piezo-injektoren/?c=image:506>.

4. Топливные дизельные форсунки: принцип работы и слабые места [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ukrautoportal.com/bok/how/engine/dizelnyy-dvigatel/3533-toplivnye-dizelnye-forsunki-principraboty-i-labye-mesta.html>.
5. Cookies, V.S. Stabilizaciya regulirovочnyh nyhpara metrov forsunokforsirovannyhdizelej [Stabilization control parameters nozzles forced diesel engines] / V.S. Cookies, V.A. Romanov // Tr. International Forum on the issues of science, technology and education. – Moscow : Academy of Earth Sciences, 2005. – P. 110–111.
6. Зеленихин, А.И. Исследование процесса коксования сопловых отверстий распылителей при работе дизеля на бензодизельной смеси / А.И. Зеленихин. – Л. : ОНТИ ЦНИТА, 1966. – Вып. 29. – С. 6–12.
7. Кукис, В.С. Стабилизация регулировочных параметров форсунок форсированных дизелей / В.С. Кукис, В.А. Романов // Tr. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. – М. : Акад. наук о земле, 2005. – С. 110–111.
8. Лаврик, А.Н. Анализ факторов, влияющих на закоксовывание сопловых отверстий распылителей топливных форсунок дизелей / А.Н. Лаврик, А.С. Теремов, В.Е. Лазарев // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин. – Челябинск : ЧВАИ, 2001. – С. 31–37.
9. Дизельные аккумуляторные топливные системы CommonRail : [пер. с нем.]. – М. : За рулем, 2009. – 354 с. – (Автомобильные технологии).
10. Неисправные форсунки и их влияние на работу дизельного двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dizonika.ru/neispravnyie-forsunki-i-ix-vliyanie-na-rabotu-dizelnogo-dvigatelya.html>.
11. Kyshchun, V. Operability loss causes for diesel fuels spray nozzle with piezoelectric driver / V. Kyshchun, L. Nesterenko // Наукові нотатки. – 2018. – № 62. – С. 137–139.
12. Кищун, В.А. Методи діагностування дизельних паливних форсунок ізп'єзоелектричним приводом / В.А. Кищун, Л.В. Нестеренко // Наукові нотатки. – 2018. – № 61. –С. 77–82.
13. Шумов, О.В. Повышение эксплуатационных свойств защитных покрытий / О.В. Шумов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / под ред. П.А. Витязя. – Минск : Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 394–397.
14. Суслов, Д.А. Контроль, испытания и диагностика узлов трения [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Д.А. Суслов, Д.Б. Колмогорцев, О.А. Горленко. – Брянск : Изд-во Брян. гос. техн. ун-та, 2005. – 113 с.
15. Восстановление деталей машин и оборудования [Электронный ресурс] / В.А. Скрыбин [и др.]. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/210618>.
16. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.

Поступила 04.05.2021

RESTORING THE FUNCTIONALITY OF THE “NEEDLE-BODY” CONNECTION OF THE DIESEL ENGINE NOZZLE SPRAYER

S. PILIPENKO, O. SHTEMPEL, V. FRUTSKIY, V. KOSTRITSKIY

The paper deals with the development of technology for repairing diesel injectors. The design of the nozzle is considered, the most repairable parts of the wearing parts are identified. It was determined that the parts of the nozzle that are destroyed in the first place and determine the operability of the nozzle as a whole are the needle and the nozzle body. The processes causing wear of these parts of the nozzle are considered. It is noticed that the total wear of the tribo-pair of the locking cone of the nozzle needle and the atomizer body is from 0.16–0.31 microns. This leads to an increase in fuel supply by 3–7%, which negatively affects both the economic factors associated with the operation of the machine and the issues of negative technogenic impact on the environment. The proposed technology for restoring the working capacity of a nozzle includes the operation of disassembling the nozzle and cleaning its parts, troubleshooting of parts, etching of the needles and nozzle bodies, the operation of coating and repairing the body, machining, assembly and testing operations. Recommendations for restoring the original dimensions and mechanical properties of the surfaces of the nozzle needle of a diesel engine are considered in detail, taking into account various classes of steels. The performance tests of the injectors restored using this technology have shown that the wear rate of the restored needles in the repaired injectors is quite acceptable for its operation.

Keywords: nozzle, failure, sprayer, plunger, wear, repair-restoration, cavitation, tribo-coupling.