Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
22-23 ноября 2018 г.

ЧАСТЬ 1

Рубцовск 2018

флаш-реакторе. Свойства гидроксидов и оксидов алюминия, образующихся на основе регидратированных в мягких условиях продуктов центробежно-термической активации гидраргиллита // Кинетика и катализ, 2007, т.48, №2. С. 1 – 10.

5. Иванова А.С. Оксид алюминия: применение, способы получения, структура и кислотно-основные свойства // Промышленный катализ в лекциях, 2009, № 8. С. 7-61.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

П.А. Тополянский[1], А.П. Тополянский[1], С.А. Ермаков[2]

[1]Научно-производственная фирма ООО «Плазмацентр»

[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Рассмотрена актуальность восстановления деталей топливной аппаратуры. Приведены основные недостатки используемых технологий упрочнения, нанесения покрытий и восстановления деталей топливной аппаратуры и концепция выбора оптимальной технологии. Рассмотрен процесс финишного плазменного упрочнения с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks (a-C:H-SiOCN). Приведены результаты исследований данного покрытия: физико-механические и трибологические свойства, аморфности, испытаний на микроабразивный износ, залечивания дефектов. Полученные результаты подтвердили эффективность использования покрытия DLCPateks для упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры, в том числе при ремонте систем впрыска топлива высокого давления Common Rail, производимых фирмами Bosch, Delphi, Denso, Siemens, применяемых в дизельных двигателях иностранных компаний Cummins Inc., MTU Friedrichshafen GmbH, Detroit Diesel Co., Deutz AG.

Ключевые слова: *плунжерная пара, инжектор, форсунка, блок управления ТНВД, ремонт топливной аппаратуры, восстановление, упрочнение.*

RECOVERY OF PRECISION PARTS OF FUEL INJECTION EQUIPMENT

P.A. Topolyanskiy[1], A.P. Topolyanskiy[1], S.A. Ermakov[2]

[1]Plasmacentre Ltd, [2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. Relevance of recovery of fuel injection equipment parts was considered. Main disadvantages of used technologies of hardening, coating and recovery of fuel injection equipment parts and concept of selection of best available technology are presented. The process of finish plasma hardening with DLCPateks (a-C:H-SiOCN) diamond-like carbon coating was considered. Results of investigation of this coating are presented: stress-strain properties and tribological behavior, amorphous state, tests for microabrasive wear, healing of defects. Obtained results proved efficiency of use of DLCPateks coating for hardening and recovery of fuel injection equipment parts as well as during repair of high-pressure fuel injection systems Common Rail produced by companies Bosch, Delphi, Denso, Siemens which are used in diesel engines of foreign companies Cummins Inc., MTU Friedrichshafen GmbH, Detroit Diesel Co., Deutz AG.

Keywords: *plunger and barrel assembly, injector, injection valve, high-pressure fuel pump control unit, repair of fuel injection equipment, recovery, hardening.*

Одним из лидеров применения топливной аппаратуры в дизельном двигателестроении является система впрыска топлива высокого давления

Common Rail, производимая фирмами Bosch, Delphi, Denso, Siemens и др. Практически каждый второй дизельный двигатель оснащен такими системами, поэтому разработка и исследование технологий восстановления изнашиваемых деталей этой аппаратуры является актуальной задачей.

Детали топливной аппаратуры испытывают практически все известные виды разрушений - усталостное, абразивное, кавитационное, эрозионное, коррозионное, электрохимическое и другие [1]. Это приводит к образованию на рабочих поверхностях выкрашиваний и отслаиваний, царапин и задиров, к налипанию и наволакиванию частиц, схватыванию и заклиниванию трущихся деталей. Величина износа деталей топливной аппаратуры, в большинстве случаев, не превышает 0,2-5 мкм [2, 3]. Исходя из микронных значений величин износа деталей топливной аппаратуры, их восстановление возможно с применением тонкопленочных покрытий.

Эффективность выбранной технологии восстановления деталей топливной аппаратуры кроме получения заданных геометрических размеров может осуществляться на основе анализа физико-механических свойств поверхностного слоя, трибологических характеристик в условиях трения скольжения, параметров шероховатости, распределения технологических остаточных напряжений по глубине и результатов испытаний на микроабразивный износ. Данные характеристики после реализации технологии восстановления должны улучшаться.

Известные технологии восстановления деталей топливной аппаратуры можно условно разбить на три группы в зависимости от твердости создаваемого поверхностного слоя:

1. **Твердость ≤ 5 ГПа (менее твердости основного материала)**

- **фрикционно-механическое латунирование** [4, 5]. Недостатки - повышенная трудоемкость из-за индивидуальной обработки деталей и, соответственно, неэффективность применения для серийных изделий.

- **алюмохромофосфатирование** [6, 7]. Способ включает нагрев герметичного контейнера с изделиями до температуры 600±20°С, подачу перегретого пара из водного раствора алюмохромофосфатной соли в течение 30-60 минут и последующее медленное охлаждение до температуры 200°С вместе с контейнером, а затем - на воздухе. В результате химического взаимодействия основного металла и активных элементов раствора в поверхностном слое образуются оксиды и интерметаллидные соединения (типа фосфидов Fe, Al, Cr и др.), способствующие предотвращению непосредственного взаимодействия трущихся металлов, уменьшению длительности приработки, параметров шероховатости и повышению износостойкости плунжерных пар. Снижение износа обеспечивается увеличением площади фактического контакта металлов и образованием покрытия, содержащего сульфиды, фосфиды и другие соединения, с малым сопротивлением сдвигу. Недостатки - многостадийность, высокая температура (600-620°С) и длительность процесса.

- **электрохимикомеханическая обработка с использованием реновационной жидкости в виде раствора полиэтиленгликоля с цинком**

[8]. Недостатки - сложность контроля за изменением геометрических размеров деталей топливной аппаратуры, временем их повышенной долговечности, трудность определения количества реновационной жидкости для определенной длительности эксплуатации.

- **ионно-плазменное напыление покрытия TiN-Cu-MoS_2** [9]. Недостатки - возможность снижения твердости деталей с низкой температурой отпуска из-за повышенных температур процесса, не высокая адгезионная прочность покрытия.

- **электроискровое нанесение медно-графитовых покрытий** [10]. Недостатки - необходимость окончательной операции доводки, наведение растягивающих напряжений в поверхностном слое, возможная несплошность покрытия.

- **нанесение фторорганических поверхностно-активных веществ (эпиламов)** [11, 12]. Недостатки - сложность контроля за изменением геометрических размеров деталей топливной аппаратуры, временем их повышенной долговечности, трудность определения количества эпилама для заданной длительности эксплуатации.

- **нанесение металлокерамического покрытия из природных слоистых силикатов на основе геоактиваторов (вермикулита, серпентинита и др.)** [13]. Нанесение покрытий из геоактиваторов осуществляется на предварительно хромированную поверхность фрикционным методом за счет прижатия неподвижного индентора к вращающейся детали и подачи капельным методом модифицирующего состава совместно с дизельным топливом. Недостатки – предварительное хромирование ведет к необходимости шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщению кислородом, наводораживанию, крупнозернистости структуры, пористости, высоким растягивающим остаточным напряжениям. Последующее слоистое покрытие из геоактиваторов трудно поддается контролю качества, имеет не высокие адгезионные характеристики.

2. Твердость 5-8 ГПа (порядка твердости основного материала)

- **электролитическое хромирование** [14, 15]. Недостатки - необходимость окончательной шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщение кислородом, наводораживание, крупнозернистость структуры, пористость, высокие растягивающие остаточные напряжения.

- **диффузионное хромирование** [16, 17]. Недостатки - повышенная температура процесса (порядка 1000°С), необходимость окончательной шлифовки, притирки и доводки поверхностей.

- **электролитическое и газообразное хромирование путем термораспада гексакарбонила хрома** [18]. Недостатки - повышенная температура процесса (400-420°С), необходимость окончательной шлифовки, притирки и доводки поверхностей.

- **нитроцементация** [19]. Недостатки - высокая продолжительность обработки, повышенная температура процесса (более 800°С), необходимость окончательной шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщение кислородом.

- **нитроцементация с введением активизирующей обмазки** [20]. Недостатки - высокая длительность, повышенная температура (более 800°С), необходимость окончательной шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщение кислородом.

- **сульфохромирование** [21]. Способ включает закалку ТВЧ до температуры 800-830°С и низкий отпуск с одновременным сульфохромированием (в соляной ванне) при температуре 130-150°С, продолжительностью не менее 1 ч. После сульфохромирования поверхностный слой состоит из оксидов и сульфидов железа, интерметаллидных соединений типа FeCr с глубиной диффузионной зоны до 9,5 мкм. Модифицированный поверхностный слой обеспечивает повышенную износостойкость, минимальную длительность приработки, обладает пластичностью и низким коэффициентом трения препятствует схватыванию, задирам и заклиниванию деталей топливной аппаратуры по сравнению с серийно используемыми материалами. Недостаток - многостадийность, повышенная температура и длительность процесса.

3. Твердость ≥11-12 ГПа (превышающая твердость абразивных частиц)

- **электролитическое хромирование с дополнительной модификацией ультрадисперсными алмазами** [22]. Недостатки – неравномерность распределения ультрадисперсных алмазов по объему ванны и со временем процесса, необходимость окончательной шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщение кислородом, наводораживание.

- **электролитическое хромирование с диэлектрическим наполнителем (оксидом алюминия)** [23]. Недостатки - образование дополнительных продуктов износа из абразивных частиц оксида алюминия, необходимость окончательной шлифовки, притирки, доводки поверхностей, газонасыщение кислородом, наводораживание.

- **ионно-плазменное напыление покрытий из TiN** [24, 25]. Недостатки - повышенный коэффициент трения, низкая адгезионная прочность при нанесении покрытий на материалы с низкой температурой отпуска, возможная разнотолщинность покрытия.

- **ионно-плазменное напыление наноструктированных покрытий TiN** [26]. Недостатки - повышенный коэффициент трения, низкая адгезионная прочность при нанесении покрытий на материалы с низкой температурой отпуска, возможная разнотолщинность покрытия.

- **покрытия, наносимые с использованием физического (PVD) и химического (CVD) осаждения покрытий из паровой фазы.** Мировые компании, оказывающие услуги на рынке напыления деталей автокомпонентов, наносят на детали топливной аппаратуры двухэлементные, трехэлементные, алмазоподобные и другие виды покрытий толщиной 1-2 мкм, например:

- IHI Hauzer Techno Coating B.V. (Голландия, www.hauzertechnocoating.com): CrN, Me-DLC (WC-C:H), DLC (a-C:H), DLC (a-C и ta-C), DLC-(a-C:H-Si);

- Schaeffler KG (Германия, www.schaeffler.de): Triondur®C+ (a-C:H), Triondur® CX+ (a-C:H:X);

- Platit AG (Швейцария, www.platit.com): CrTiN, nACRO®(nc-FlCrN/a-Si_3N_4)

- Oerlikon Balzers (Лихтенштейн-Россия) [www.oerlikon.com] - BALINIT®C (WC/C (a-C:H:W), BALINIT DLC STAR;

- STS Group S.r.l. (Италия, www.sts-group.it): CrN, WC/C, DLC (a-C:H sp2-sp), PLC (Me-DLC);

- WOLF Beschichtungstechnologie GmbH (Германия, www.wolf-gruppe.com): CrN, CROMASPEED, DLC 4000, SUCASLIDE;

- Sputtek Inc. (Канада, www.sputtek.com): D-ARC 1 (CR/CRN/α-C:H), D-ARC 2 (CR doped α-C:H), D-ARC 3 (Ti doped α-C:H), D-ARC 4 (CR/WC/α-C:H), D-ARC 5 (CR/WC doped/α-C:H), D-ARC 6 (CR/ta-C).

Недостатки - многостадийность, сложность и дороговизна оборудования, большое количество обслуживающего персонала, возможная повышенная шероховатость за счет микрокапельной фазы, низкая адгезионная прочность PVD процессов при температурах процесса менее 200°C.

Максимально эффективными являются алмазоподобные покрытия, наносимые методом PACVD (химическое осаждение покрытий с плазменной активацией) при температуре процесса менее 200°C с использованием газов силана (SiH_4) и смеси метана с водородом. Покрытие имеют твердость порядка 16 ГПа, коэффициент трения 0,02-0,06 [27, 28].

- **финишное плазменное упрочнение с нанесением многослойных износостойких покрытий** [29, 30]. Метод относится к PACVD процессам. Недостатки – зависимость воспроизводимости процесса от большого количества технологических параметров, необходимость оптимизации общей толщины покрытия и толщины монослоя покрытия, выбора оптимальных технологических реагентов и их расходов.

Рассмотренные выше технологии, а также знание конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, связанных с износостойкостью, позволили сформулировать методологию выбора оптимального процесса нанесения покрытий с целью упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры:

- технология должна быть финишной и низкотемпературной операцией, исключающей любую окончательную абразивную (доводочную) обработку и обеспечивающей создание на поверхности сжимающих остаточных напряжений (практически все известные технологии упрочнения требуют доводки рабочих поверхностей со всеми негативными последствиями в связи с образованием микротрещин, растягивающих напряжений и уменьшением усталостной прочности);

- на рабочих поверхностях должно формироваться аморфное неметаллическое покрытие с повышенной адгезионной прочностью к подложке толщиной до 2 мкм, с максимальными значениями стойкости к упругой деформации или индексом пластичности (H_{IT}/E_r), стойкости к пластической деформации (H_{IT}^3/E_r^2), упругого восстановления (η_{IT}) и модулем упругости близким к модулю упругости подложки;

- рабочие поверхности с покрытием должны иметь минимальные трибологические характеристики (коэффициент трения, температура в зоне трения, длительность приработки, параметры износа);

- коэффициент износа в условиях микроабразивного изнашивания, определяемый по EN 1071-6:2007, должен иметь минимальное значение;

- рабочие поверхности должны характеризоваться повышенными гидрофильными свойствами (меньшим углом смачивания), обеспечивающими максимальные смазывающие свойства топлива и обеспечивать диэлектрические характеристики, способствующие исключению электромеханического износа;

- параметры шероховатости по EN ISO 13565-2:1996, характеризующие высоту выступов, (R_{pk}) и основу профиля (R_k) должны иметь минимальные значения.

В соответствии с данной концепцией выбора технологии повышения долговечности деталей топливной аппаратуры рассмотрим метод финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks (a-C:H/a-SiOCN). Процесс ФПУ основан на разложении паро́в жидких химических соединений, вводимых в плазму дугового разряда, и образовании атомарного и молекулярного потока частиц в плазмоструйном реакторе. Нагрев изделий при ФПУ не превышает 150°С. В результате ФПУ на рабочих поверхностях образуется неметаллическое аморфное, в том числе алмазоподобное, многослойное покрытие с низким коэффициентом трения, повышенной микротвердостью, химической инертностью, гидрофильностью, высокой жаростойкостью и диэлектрическими характеристиками. Кроме этого, эффективность использования ФПУ основана на возможности локального нанесения покрытия в заданной зоне, а также повторном его нанесении после проверки на тест-план при недостаточной толщине.

Рассмотрим отдельные свойства покрытия DLCPateks толщиной порядка 1 мкм, нанесенного с использованием технологии ФПУ. В качестве материала подложки использовалась термообработанная сталь ШХ15.

Физико-механические свойства

Анализ результатов наноиндентирования выявил, что с повышением нагрузки и, соответственно, с увеличением контактной глубины твердость уменьшается, что характеризует покрытие DLCPateks как градиентное. В пределах одной нагрузки твердость изменяется от 14 ГПа до 23 ГПа, что свойственно многокомпонентным покрытиям. Усредненные свойства покрытия DLCPateks: нанотвердость - 18 ГПа, модуль Юнга - 127 ГПа, упругое восстановление - 87%. На рис. 1 представлена диаграмма индентирования покрытия DLCPateks. Стойкости поверхностного слоя к упругой деформации (индекс пластичности) H_{IT}/E_r составляет 0,14. Модуль Юнга стали ШХ15 равен 211 ГПа. Высокое значение индекса пластичности обеспечивает повышенный ресурс в условиях циклических нагрузок, а близость значений модулей упругости покрытия и подложки способствует снижению технологических напряжений на поверхности раздела и повышению адгезионной прочности.

Трибологические свойства

На рис. 2 приведена диаграмма, характеризующая падающий характер изменения коэффициента трения (нижняя кривая) со временем покрытия DLCPateks. Испытания проводились по схеме «шар-диск» с использованием шаров диаметром 3 мм, изготовленных из нитрида кремния Si_3N_4. Нагрузка на контртело составляла 5 Н. Линейная скорость скольжения - 10 см/с. Путь трения – 80-100 м. При испытаниях применялось моторное масло Nissan SAE 5W-40. Среднее значение коэффициента трения составляет 0,024.

Аморфность

Исследования, проведенные с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100 (JEOL, Япония), показали, что покрытие DLCPateks является аморфным (рис. 3) и представляет структуру с размером элементов 60-100 Å. Аморфное (стеклообразное) состояние материала покрытия (в отличие от кристаллического) характеризуется отсутствием границ зерен и дислокационных дефектов, обеспечивает максимально эффективное заполнение впадин профиля подложки.

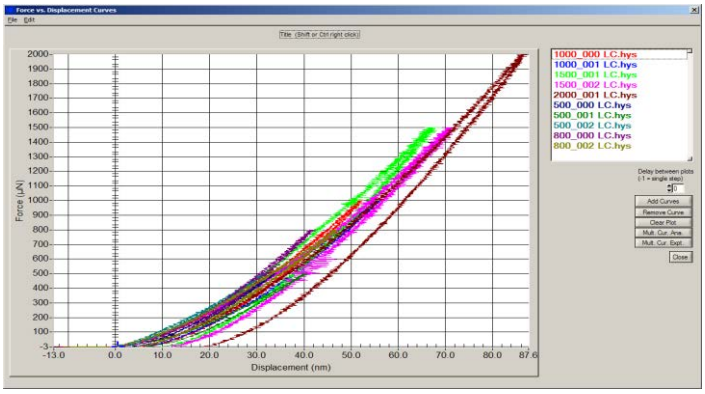

Рис. 1. Диаграммы индентирования *F-h* при разных нагрузках покрытия DLCPateks (TI 750Ubi, Hysitron, США)

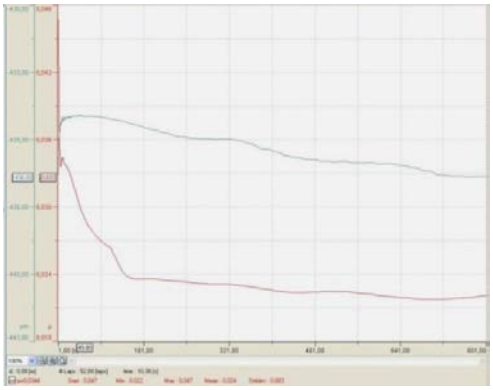

Рис. 2. Изменение коэффициента трения со временем покрытия DLCPateks (TRB-S-DE, CSM-Instruments, Швейцария)

Испытания на микроабразивное изнашивание

Исследования проводились в соответствии с международным стандартом EN 1071-6:2007 при использовании шаров диаметром 30 мм из стали ШХ15 с твердостью 60-62 HRC и параметром шероховатости поверхности $R_a \leq 0{,}1$ мкм. Нормальная нагрузка на образец составляла 0,25 Н. При испытаниях применялась абразивосодержащая суспензия на водной основе с монокристаллами синтетического алмаза диаметром 1 мкм. Условия испытаний: круговая скорость вращения вала 100 об/мин, время испытаний 30 с. В результате испытаний получен коэффициент износа покрытия, равный $7{,}61 \times 10^{-13}$ $м^3 Н^{-1} м^{-1}$. На рис. 4 представлена микрофотография отпечатка подложки с покрытием.

коэффициент износа K_s 10^{-5} ($м^3Н^{-1}м^{-1}$)	6,22 (№ БП-2)
Покрытие	
материал	TiN
толщина (мкм)	2,92 (№ T-TiN)
технология нанесения	PVD
Условия испытаний	
температура в помещении (°C)	25±5
влажность (%)	35±10
время испытания $t_{исп}$ (сек)	60
скорость вращения вала/шара (об/мин)	100/67
материал шара	сталь ШХ15
радиус шара (мкм)	15000
длина пути скольжения S (м)	6,312
суспензия	алмазная (1мкм), водная
количество суспензии	3 капли до испытаний
нормальная нагрузка N (Н)	0,25
Оборудование	
модель	Tribotester PC102
микроскоп	Альтами МВ0850СД

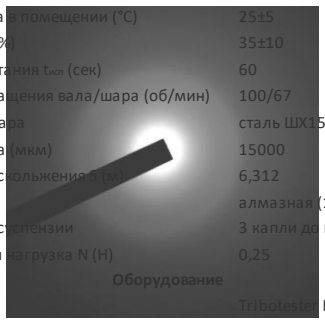

Рис. 3. Электронограмма покрытия DLCPateks, характеризующая его аморфность

K_c- коэффициент износа покрытия, $м^3Н^{-1}м^{-1}$; K_s- коэффициент износа подложки, $м^3Н^{-1}м^{-1}$; S - длина пути скольжения, м; N - нормальная нагрузка, Н; W_s- скорость изнашивания подложки, $мкм^3/с$; I_s- интенсивность изнашивания подложки, $мм^3/м$; W_c- скорость изнашивания покрытия, $мкм^3/с$; I_c- интенсивность изнашивания покрытия, $мм^3/м$; $t_{исп}$- время испытания, с; W_{cs}- скорость изнашивания покрытия и подложки, $мкм^3/с$; I_{cs}- интенсивность изнашивания покрытия и подложки, $мм^3/м$; V_s+V_c- сумма обьемного износа подложки и покрытия, $мкм^3$.

Микрофотография отпечатка №1

Рис. 4. Микрофотография отпечатка покрытия DLCPateks после испытаний на микроабразивное изнашивание (Tribotester PC 103, Плазмацентр, Россия)

№	a_{ipar} мкм	$a_{ипр}$ мкм	b_{ipar} мкм	$b_{ипр}$ мкм	$a_{ср}$ мкм	$b_{ср}$ мкм	V_c $мкм^3$	V_c*10^5 $мкм^3$	(V_s+V_c)*10^5 $мкм^3$	K_c $м^3Н^{-1}м^{-1}$	K_c*10^{13} $м^3Н^{-1}м^{-1}$	W_c $мм^3/м$	I_c*10^5 $мкм^3/с$	K_s $м^3Н^{-1}м^{-1}$	K_s*10^5 $мм^3/м$	W_s $мкм^3/с$	I_s*10^5 $мм^3/м$	W_{cs} $мкм^3/с$
1	574,66	574,66	817,9	817,9														
2	461,97	461,97	749,8	749,8	509,32	778,47	2,28	9,81	12,01	7,61	15,54	0,15	1,39	3,49	0,04	19,03	0,20	
3	491,32	491,32	767,7	767,7														

Залечивание дефектов

В связи с получением сжимающих напряжений на поверхности и нанесением покрытий в аморфном состоянии происходит залечивание дефектов и трещин (глубоких и узких впадин профиля) поверхностного слоя, образованных от предшествующих операций изготовления изделий. Это должно способствовать увеличению усталостной прочности деталей с покрытием. Исследования трехмерной топографии поверхности с использованием прибора MarSurf WS1 фирмы Mahr GmbH (Германия) зоны перехода покрытие DLCPateks –подложка из стали ШХ15 показали, что после нанесения покрытия обеспечивается залечивание глубоких впадин поверхностного рельефа (рис. 5).

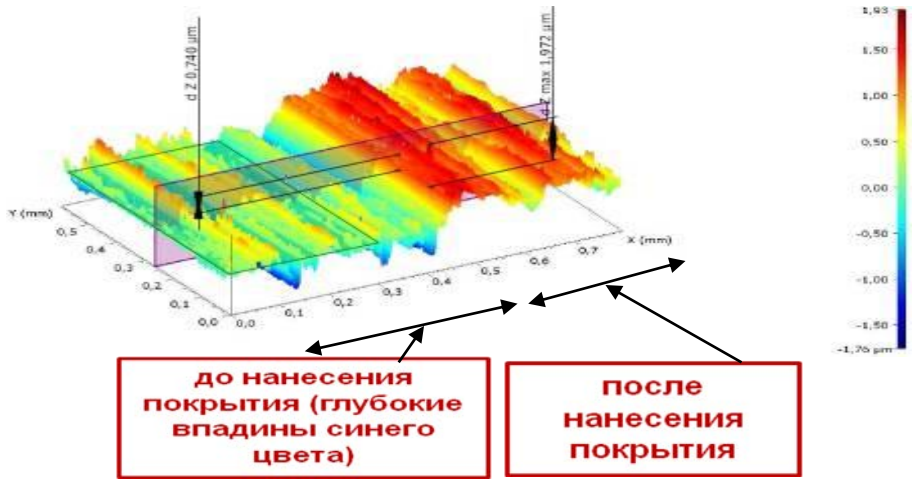

Рис. 5. Трехмерная топография поверхности покрытия DLCPateks, где а - до нанесения покрытия видны глубокие впадины синего цвета, б - после нанесения покрытия впадины синего цвета исчезли

Экспериментальные стендовые испытания на соответствие допускам тест-планов доказали возможность использования технологии ФПУ с нанесением покрытия DLCPateks при восстановлении штоков и клапанов мультипликатора,

игл распылителя и клапанов форсунки топливных систем Common Rail.

В настоящее время в России имеется достаточно большой парк импортной техники, использующей дизельные двигатели иностранных компаний, таких как Cummins Inc., MTU Friedrichshafen GmbH, Detroit Diesel Co., Deutz AG. Данные двигатели применяются у мировых производителей крупнотоннажных автомобилей, дорожно-строительной и специальной техники Caterpillar, Terex, Komatsu, Hitachi, Liebherr. В технике марок БЕЛАЗ и ЧЕТРА также используются двигатели, например, компаний Cummins Inc. и MTU Friedrichshafen GmbH. Все эти двигатели имеют дизельную топливную аппаратуру, подверженную износу. На рис. 6, 7, 8 представлены отдельные детали топливной аппаратуры, используемые для карьерных большегрузных самосвалов и машин повышенной проходимости марки БЕЛАЗ, восстанавливаемые путем нанесения тонкопленочного покрытия DLCPateks.

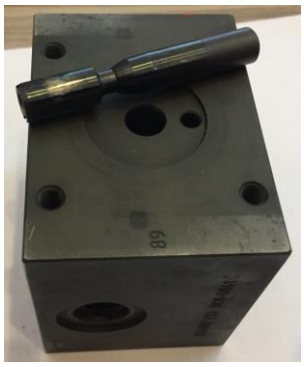

Рис. 6. Блок управления ТНВД (№ 23540850) двигателей MTU 16V4000 (MTU Friedrichshafen GmbH, Германия)

Рис. 7. Форсунка (№ 4088427) двигателей Cummins QSK45 (Cummins Inc., США)

Рис. 8. Плунжерная пара (баррель и плунжер) подачи топлива ТНВД (№ 3077526) двигателей Cummins КТА 50, КТТА 38 (Cummins Inc., США)

Таким образом, перспективными способами упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры являются процессы, исключающие последующую абразивную обработку, например, метод ФПУ с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks, эффективность которого определяется

его аморфным состоянием, оптимальными физико-механическими и трибологическими характеристиками, залечиванием поверхностных дефектов.

Список литературы

1. Сагин, С.В. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре высокого давления судовых дизелей. / С.В. Сагин // Проблеми техніки. 2013. № 2. С. 33-42.

2. Бодров, А.С., Катунин, А.А., Маркин, А.С. и др. Исследование причин выхода из строя иглы распылителя дизельных топливных форсунок. / А.С. Бодров, А.А. Катунин, А.С. Маркин // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта. Материалы МНТК. 2017. Вып. 1. Тула. С. 34-40.

3. Мылов, А.А., Шавыкин, Ю.А. Комплектование прецизионных пар топливной аппаратуры дизелей. / А.А. Мылов, Ю.А. Шавыкин // Машиностроение и инженерное образование. № 3. 2008. С. 55-63.

4. Баранов, М.Н., Исупов, М.Г. Фрикционно-механическое латунирование прецизионных деталей трения. / М.Н. Баранов, М.Г. Исупов. // Трибология и надежность: Сб. научных трудов IX Международной конференции, 8-10.10.2009. СПб. 2009. С. 179-181.

5. Румянцев, Г.И. Фрикционное латунирование деталей топливной аппаратуры. / Г.И. Румянцев // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. М.: Машиностроение. 1977. С. 155-159.

6. Тимофеев, С.С. Повышение износостойкости плунжерных пар. / С.С. Тимофеев. // Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 10-й МНТК. 24-28 мая 2010 г., Киев: АТМ Украины. 2010. С. 194-196.

7. Тимофеев, С.С., Мовшович, А.Я., Остапчук, В.Н. Повышение износостойкости деталей топливной аппаратуры тепловозных двигателей. / С.С. Тимофеев, А.Я. Мовшович, В.Н. Остапчук. // Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 6-й международной научно-технической конференции. 30.05-01.06. 2006 г. Ялта-Киев. С. 143-145.

8. Мозговой, И.В., Макаренко, Н.Г., Доровских, Е.В., Куринной, М.В. Технология электрохимикомеханической обработки прецизионных пар. / И.В. Мозговой, Н.Г. Макаренко, Е.В. Доровских, М.В. Куринной // Омский научный вестник. 2012. № 1. С. 324-327.

9. Остапчук, В.Н. Разработка способов восстановления изношенных поверхностей деталей средств транспорта. / В.Н. Остапчук // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2013. Вип. 142. С. 72-80.

10. Лебедев, А.Т., Лебедев, П.А. Восстановление работоспособности плунжерных пар. / А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 1. С. 23-24.

11. Заблоцкий, Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей. / Ю.В. Заблоцкий // Судовые энергетические установки. Одесса: ОНМА. 2015. № 35. С. 83-91.

12. Гайдар, С.М. Восстановление рабочих параметров плунжерных пар и повышение надежности топливной системы дизельных двигателей. / Гайдар С.М. // Международный технико-экономический журнал. 2010. № 1. С. 54-58.

13. Леонтьев, Л.Б., Шапкин, Н.П., Леонтьев, А.Л. Формирование износостойких покрытий на прецизионных узлах трения. / Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, А.Л. Леонтьев // Металлообработка. 2011. № 3. С. 14-17.

14. Тихненко, В.Г. Технология восстановления изношенных деталей хромированием. / В.Г. Тихненко // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. № 3. 2008.С. 115-116.

15. Кривашин, А.Ю., Королев, А.Е., Достовалов, В.В. Установка для электролитического восстановления плунжерных пар. / А.Ю. Кривашин, А.Е. Королев, В.В. Достовалов. // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы L МНТК. Челябинск: ЧГАА. 2011. Ч. IV. С. 31-34.

16. Кодинцев, Н.П. Упрочнение плунжерных пар топливных насосов высокого давления. / Н.П. Кодинцев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 11-4. С. 16-18.

17. Гусейнов, А.Г. Восстановление и упрочнение прецизионных деталей машин и аппаратуры комплексной диффузионной металлизацией. / Гусейнов А.Г. // Вестник машиностроения. 2000. № 5. С. 40-45.

18. Борисов, Г.А., Миронов, В.В. Восстановление прецизионных пар нанесением металлоорганических соединений. / Г.А. Борисов, В.В. Миронов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2004. № 9. С. 25-27.

19. Грашков, С.А. Повышение долговечности деталей дизельной топливной аппаратуры нитроцементацией. / С.А. Грашков // Молодежь и наука, реальность и будущее. Матер. 1-ой МНПК. Невинномысск. НИЭУП. 2008 С. 317-319.

20. Ворначева, И.В., Гадалов, В.Н., Филонович, А.В., Тураева, О.А., Макарова, И.А. Применение нитроцементации для увеличения работоспособности узлов топливных насосов. / И.В. Ворначева, В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, О.А. Тураева, И.А. Макарова // Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сб. материалов 6-й МНПК. 20-21 октября 2016 г. Курск. 2016. С. 38-40.

21. Думнов, С.Н., Лабаров, Д.Б., Болоев, П.А. К вопросу восстановления плунжерных пар топливных насосов дизельных двигателей. / С.Н. Думнов, Д.Б. Лабаров, П.А. Болоев // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий управления. Улан-Удэ: ВСГУТУ. 2014. № 3 (48). С. 48-53.

22. Скобло, Т.С., Клочко, О.Ю., Сидашенко, А.И., Плугатарев, А.В., Олейник, А.К. Исследование влияния ультрадисперсных алмазов при восстановлении и упрочнении деталей узлов топливной аппаратуры. / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, А.И. Сидашенко, А.В. Плугатарев, А.К. Олейник // Проблеми трибології (Problems of Tribology). 2015. № 1. С. 106-111.

23. Жачкин, С.Ю., Краснова, М.Н., Пеньков, Н.А., Краснов, А.И. Повышение адгезии гальванических композитных покрытий, используемых

при восстановлении плунжерных пар ТНВД. / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, А.И. Краснов // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 119. Ч 1. С. 54-60.

24. Аксаков, А.Г. Комплексное решение вопроса увеличения ресурса и повышения надежности топливной аппаратуры дизелей. / А.Г. Аксаков // Двигателестроение. 2003. № 1. С. 58-60.

25. Габитов, И.И., Сайфуллин, Р.Н., Валиев, А.Р. Упрочнение клапанных узлов электрогидравлических форсунок дизелей при ремонте. / И.И. Габитов, Р.Н. Сайфуллин, А.Р. Валиев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 7. С. 328-335.

26. Тарасенко, Ю.П., Кривина, Л.А., Фель, Я.А. Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов. / Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, Я.А. Фель // Известия Высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. №3. С. 142-148.

27. Hershberger J., Ozturk O., Ajayi O.O., Woodford J.B., Erdemir A., Erck R.A., Fenske G.R. Evaluation of DLC coatings for spark-ignited, direct-injected fuel systems. Surface and Coatings Technology. 179 (2004). 237-244.

28. Christoph P.O. Treutler. Industrial use of plasma-deposited coatings for components of automotive fuel injection systems. Surface and Coatings Technology. 200 (2005). 1969-1975; Cha S.C., Erdemir A. Coating Technology for Vehicle Applications. Springer. 2015. 248 p.

29. Адигамов, Н.Р., Лялякин, В.П., Соловьев, Р.Ю., Шарифуллин, С.Н. Плазменные технологии в повышении эффективности работы топливных насосов высокого давления дизельных двигателей. / Н.Р. Адигамов, В.П Лялякин., Р.Ю. Соловьев, С.Н. Шарифуллин // Сварочное производство. 2016. № 2. С. 49-51.

30. Васин, В.А., Лебедев, А.Т., Лебедев, П.А. и др. Повышение ресурса плунжерных пар при их восстановлении. / В.А. Васин, А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев // Научная мысль. 2016. № 5. С. 147-153.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ АКУСТОПОВРЕЖДЕННОСТИ

Д.А. Третьяков, А.А. Альхименко, А.Р. Галяутдинова, С.А. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Выявлено существенное влияние структурных неоднородностей на поле акустической анизотропии для элементов внутреннего контура термоядерного реактора ITER из наноструктурированного карбида кремния. Полученные оценки для поврежденностей вблизи и на удалении от места разрушения образцов говорит о возможности применения метода акустоповрежденности для неразрушающего контроля конструкций из наноструктурированного карбида кремния.

Ключевые слова: *наноструктурированный карбид кремния, термоядерный реактор ITER, меры тензора поврежденности, акустическая анизотропия, метод акустоповрежденности.*