

Академия наук Республики Татарстан
Министерство образования и науки Республики Татарстан
Казанский федеральный университет
Казанский национальный исследовательский
технологический университет
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской академии наук»



**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
IX ВСЕРОССИЙСКАЯ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

СБОРНИК СТАТЕЙ

Казань 2018

ФИНИШНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

П.А. Тополянский¹, С.Н. Шарифуллин^{2,3}, Н.Р. Адигамов³,
С.А. Ермаков¹, А.П. Тополянский¹

¹Научно-производственная фирма «Плазмацентр»

²Казанский (Приволжский) федеральный университет

³Казанский государственный аграрный университет

E-mail: saidchist@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств алмазоподобных покрытий типа DLCPlateks (а-C:H/a-SiOCN), полученных на поверхностях трения транспортировкой атомарного и молекулярного потока частиц паров жидких химических соединений плазменной струей дугового плазмотрона атмосферного давления. Образованный на рабочих поверхностях слой представляет собой неметаллическое аморфное многослойное покрытие с низким коэффициентом трения, повышенной микротвердостью, химической инертностью, гидрофильностью, высокой жаростойкостью и диэлектрическими характеристиками. Чтобы минимизировать возможную дефектность основного материала на заключительной стадии изготовления деталей топливной аппаратуры предлагается наносить на них тонкопленочные покрытия.

Ключевые слова: восстановление, покрытие, финишное плазменное упрочнение, износ, шероховатость, твердость, износостойкость, аморфность, гидрофильность, адгезионная прочность, ресурс.

Введение

В последнее время ощущается востребованность технологий упрочнения и восстановления изнашиваемых деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей, способных продлить их ресурс, сэкономить финансовые, материальные и временные затраты потребителя. В связи с этим разработка эффективных технологий упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры является перспективным направлением исследований [1–20]. Этому также способствует широкое применение машин и оборудования с иностранной топливной аппаратурой, для которой использование ремонтных технологий особенно экономически оправдано.

Одним из лидеров применения 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 также является актуальной задачей.

Основная нагрузка на детали, работающие в условиях трения и износа, воспринимается тонким поверхностным слоем, в связи с этим наиболее часто применяются износостойкие тонкопленочные покрытия. Для рационального выбора материалов покрытий и технологий их нанесения с целью повышения ресурса, надежности, и восстановления прецизионных деталей топливной аппаратуры целесообразно рассмотреть условия их эксплуатации, причины износа, разработать методологию выбора оптимального покрытия и технологии его нанесения, провести исследование отдельных свойств покрытий.

Технологии нанесения покрытий для упрочнения и 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; алюмохромоfosфатирование; ионно-плазменное напыление покрытия TiN-Cu-MoS₂; электрохимикомеханическая обработка с использованием реновационной жидкости в виде раствора полиэтиленгликоля с цинком; электроискровое нанесение медно-графитовых покрытий; нанесение фторорганических поверхностно активных веществ (эпиламов); нанесение металлокерамического покрытия из природных слоистых силикатов на основе геоактиваторов (вермикулита, серпентинита и др.).

2. **Твердость 5–8 ГПа** (порядка твердости основного материала): электролитическое хромирование; – диффузионное хромирование; нитроцементация; электролитическое и газообразное хромирование путем термораспада гексакарбонила хрома; сульфохромирование; нитроцементация с введением активизирующей обмазки.

3. **Твердость ≥ 11 –12 ГПа** (превышающая твердость абразивных частиц): ионно-плазменное напыление покрытий из TiN; электролитическое хромирование с дополнительной модификацией ультрадисперсными алмазами; электролитическое хромирование с дизелектрическим наполнителем (оксидом алюминия); ионно-плазменное напылениеnanoструктурированных покрытий TiN; покрытия, наносимые с использованием физического (PVD) и химического (CVD) осаждения покрытий из паровой фазы; финишное плазменное упрочнение с нанесением многослойных износостойких покрытий.

Рассмотренные выше технологии, а также конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы, связанные с износостойкостью, позволили сформулировать методологию выбора оптимального процесса нанесения покрытий с целью упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры. В соответствии с рассмотренной концепцией выбора технологии повышения долговечности деталей топливной аппаратуры рассмотрим финишное плазменное упрочнение (ФПУ) с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPlateks (a-C:H/a-SiOCN). Процесс ФПУ основан на разложении паров 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 многослойное покрытие с низким коэффициентом трения, повышенной микротвердостью, химической инертно-

стостью, гидрофильностью, высокой жаростойкостью и диэлектрическими характеристиками.

При ФПУ также производится очистка деталей от технологических загрязнений (микрозаусенцев, частиц обрабатываемого и режущего материала, окислов металлов, компонентов притирочных паст, остатков масел, растворителей, жиров, технологических растворов, пыли, песка, влаги, продуктов разложения рабочих и технологических жидкостей, микроорганизмов и продуктов их деятельности).

Анализ показывает, что порядка 80 % плунжерных пар изначально имеют повышенный зазор между плунжером и втулкой. Поэтому в процессе замены деталей при ремонте топливной аппаратуры также целесообразно производить их ФПУ с нанесением на рабочие поверхности покрытия DLCPlateks, которое уменьшит исходный зазор и будет препятствовать схватывания рабочих поверхностей.

Методика проведения исследований

При исследовании свойств покрытия DLCPlateks, нанесенного по технологии ФПУ, в качестве материала подложки использовалась термообработанная сталь ШХ15. Толщина нанесенного покрытия составляла порядка 1 мкм. Для определения коэффициента трения покрытия DLCPlateks 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. Исследования аморфности покрытия проводились с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100 (JEOL, Япония). Для измерений параметров шероховатости по EN ISO 13565-2:1996 использовался измерительно-вычислительный комплекс «Профиль». Адгезия покрытия DLCPlateks к стали ШХ15 определялась методом скреч-тестирования (scratch test) с определением нагрузки начала разрушения при продольном перемещении и переменном ее усилии на алмазный индентор.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов наноиндентирования выявил, что с повышением нагрузки и, соответственно, с увеличением контактной глубины твердость уменьшается, что характеризует покрытие DLCPlateks как градиентное. В пределах одной нагрузки твердость изменяется от 14 ГПа до 23 ГПа, что свойственно многокомпонентным покрытиям. Усредненные свойства покрытия DLCPlateks: нанотвердость – 18 ГПа, модуль Юнга – 127 ГПа, упругое восстановление – 87 %. На рис. 1 представлена диаграмма индентирования покрытия DLCPlateks. Стойкости поверхностного слоя к упругой деформации (индекс пластичности) H_{IP}/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. На рис. 2 приведена диаграмма,

характеризующая падающий характер изменения коэффициента трения (нижняя кривая) со временем покрытия DLCPlateks. Среднее значение коэффициента трения составляет 0,024.

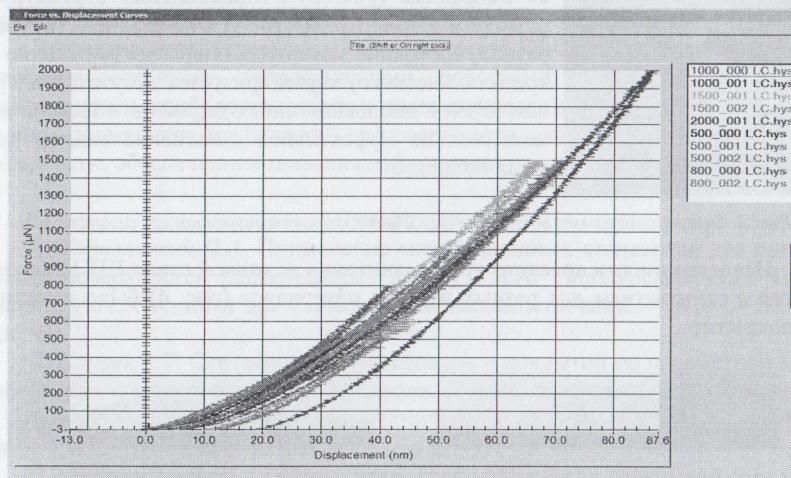


Рис. 1. Диаграммы индентирования F - h при разных нагрузках покрытия DLCPlateks (TI 750Ubi, Hysitron, США)

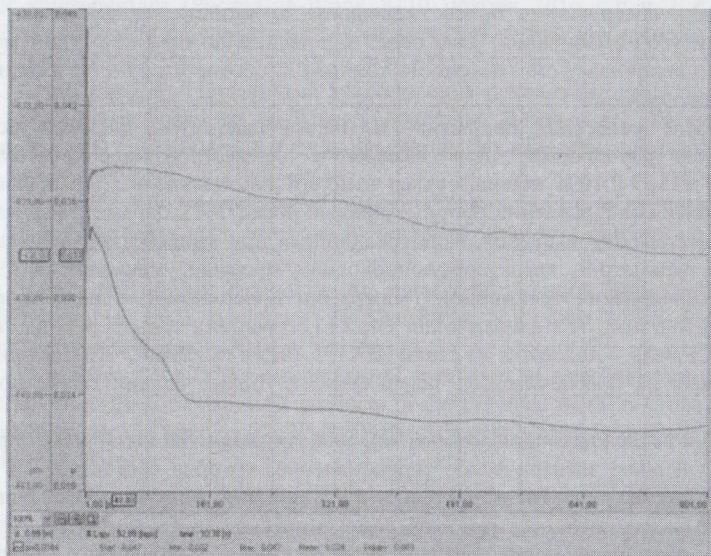
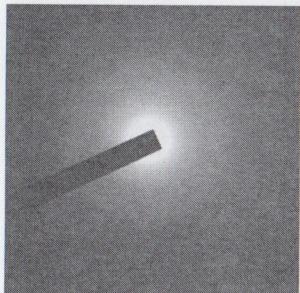


Рис. 2. Изменение коэффициента трения со временем покрытия DLCPlateks (TRB-S-DE, CSM-Instruments, Швейцария)



Исследования, проведенные с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100 (JEOL, Япония), показали, что покрытие DLCPlateks 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. 3. Электронограмма покрытия DLCPlateks, характеризующая его аморфность

Исследованиями краевого угла смачивания исходной стали ШХ15 без покрытия и с покрытием для разных жидкых материалов (рис. 4) было доказано, что покрытие



Рис. 4. Краевой угол смачивания: а) без покрытия, б) с покрытием DLCPlateks (OCA 15EC, DataPhysics Instruments GmbH, Германия)

DLCPlateks обеспечивает более гидрофильные свойства поверхности (имеет меньший угол смачивания). Это ведет к повышению поверхностной энергии, которая увеличивает смачиваемость топлива и, соответственно, его смазывающую способность.

После нанесения покрытия DLCPlateks параметры шероховатости поверхности улучшаются. Для измерений параметров шероховатости по EN ISO 13565-2:1996 использовался измерительно-вычислительный комплекс «Профиль». При сравнении опорных кривых после ФПУ параметр R_{pk} , характеризующий высоту выступов, изнашивающихся при приработке, уменьшился в 1,3 раза; параметр R_k , характеризующий основу профиля, уменьшился в 3,9 раза.

Исследования трехмерной топографии поверхности, с использованием прибора MarSurf WS1 фирмы Mahr GmbH (Германия), зоны перехода «покрытие DLCPlateks – подложка из стали ШХ15» также показали, что после нанесения покрытия обеспечивается заlewивание глубоких впадин поверхностного рельефа.

При исследовании электрических свойств покрытия DLCPlateks определено его удельное электрическое сопротивление, которое составляет 10^6 Ом·м. Данные диэлектрические характеристики покрытия должны обеспечивать отсутствие электрохимических и электромеханических явлений при трении.

В настоящее время детали типа плунжер и призма с покрытием DLCPlateks проходят испытания на ООО УК «Алтайский завод прецизионных изделий» (Барнаул) на безмоторном стенде Hartridge Cri-PC.

Выводы

Наиболее перспективными способами упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры являются процессы, исключающие последующую абразивную обработку, например, процесс ФПУ с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPlateks.

Эффективность алмазоподобного покрытия DLCPlateks определяется его аморфным состоянием, гидрофильными свойствами, оптимальными физико-механическими, трибологическими и диэлектрическими характеристиками, созданием сжимающих напряжений на поверхности, снижением параметров шероховатости, обеспечением повышенной адгезии.

Литература

1. Тополянский П.А. Применение международных стандартов для оценки свойств поверхностей подверженных износу / П.А. Тополянский, А.П. Тополянский, Н.А. Сосин и др. // Технология машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 56–60.
2. Канаев А.Т. Сертификация материалов и покрытий по параметрам микробразивного изнашивания / А.Т. Канаев, П.А. Тополянский, С.А. Ермаков и др. // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – 2017. – № 2 (93). – С. 111–119.
3. Тополянский П.А. Испытания трибологических покрытий на микробразивное изнашивание / П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский // Механика и трибология транспортных систем: матер. Международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 8–10 ноября 2016 г.); в 2 т. – Ростов н/Д: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – Т. 2. – С. 217–223.
4. Адигамов Н.Р. Плазменные технологии в повышении эффективности работы топливных насосов высокого давления дизельных двигателей / Н.Р. Адигамов, В.П. Лялякин, Р.Ю. Соловьев и др. // Сварочное производство. – 2016. – № 2. – С. 49–51.
5. Sharifullin S.N. Improving the quality indicators fuel pump of plasma technology / S.N. Sharifullin, A.S. Pirogova // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 789.
6. Solovev R.Y. Plasma technology for increase of operating high-pressure fuel pump diesel engines / R.Y. Solovev, S.N. Sharifullin, N.R. Adigamov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 669.
7. Sharifullin S.N. On the mechanism of formation of wear-resistant coatings on the friction surfaces of technical products in the presence of these drugs Tribol / S.N. Sharifullin, A.V. Dunayev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 134, 2016.
8. Dounaev A. Friction surfaces modification using tribo-compounds / A. Dounaev, S. Sharifullin // World Applied Sciences Journal, 31 (2), 2014. – P. 272–276.

9. Sharifullin S.N. Surface hardening of cutting elements agricultural machinery vibro arc plasma / S.N. Sharifullin, N.R. Adigamov, N.N. Adigamov et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 669.
10. Kadymetov A.M. Features of thermal processes of plasma deposition and hardening of coatings with external modulation parameters of the arc / A.M. Kadymetov, S.N. Sharifullin, A.F. Maltsev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 134, 2016.
11. Сагин С.В. Триботехнические процессы, протекающие в топливной аппаратуре высокого давления судовых дизелей / С.В. Сагин // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 33–42.
12. Бодров А.С. Исследование причин выхода из строя иглы распылителя дизельных топливных форсунок / А.С. Бодров, А.А. Катунин, А.С. Маркин и др. // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: матер. МНТК. – 2017. – Вып. 1. – С. 34–40.
13. Тимофеев С.С. Повышение износостойкости плунжерных пар. Инженерия поверхности и реновация изделий / С.С. Тимофеев // Материалы 10-й МНТК (Киев, 24–28 мая 2010 г.). – Киев: АТМ Украина, 2010. – С. 194–196.
14. Тимофеев С.С. Повышение износостойкости деталей топливной аппаратуры тепловозных двигателей / С.С. Тимофеев, А.Я. Мовшович, В.Н. Остапчук // Инженерия поверхности и реновация изделий: матер. 6-й Международной научно-технической конференции (Ялта; Киев, 30 мая – 1 июня 2006 г.). – С. 143–145.
15. Лебедев А.Т. Восстановление работоспособности плунжерных пар / А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 1. – С. 23–24.
16. Гайдар С.М. Восстановление рабочих параметров плунжерных пар и повышение надежности топливной системы дизельных двигателей / С.М. Гайдар // Международный технико-экономический журнал. – 2010. – № 1. – С. 54–58.
17. Скобло Т.С. Исследование влияния ультрадисперсных алмазов при восстановлении и упрочнении деталей узлов топливной аппаратуры / Т.С. Скобло, О.Ю. Ключко, А.И. Сидашенко и др. // Проблемы трибологии. – 2015. – № 1 – С. 106–111.
18. Жачкин С.Ю. Повышение адгезии гальванических композитных покрытий, используемых при восстановлении плунжерных пар ТНВД / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков и др. // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 119. – Ч. 1. – С. 54–60.
19. Габитов И.И. 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.
20. Hershberger J. Evaluation of DLC coatings for spark-ignited, direct-injected fuel systems / J. Hershberger, O. Ozturk, O.O. Ajayi et al. // Surface and Coatings Technology, 179, 2004. – P. 237–244.