Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук

Межведомственный научный совет по трибологии

Ассоциация инженеров-трибологов России

при информационной поддержке журналов
«Трение и износ», «Проблемы машиностроения и надежности машин»,
«Сборка в машиностроении, приборостроении» и «Lubricants»

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

XII Международная научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ИМАШ РАН

Сборник трудов конференции

Proceedings of XII International scientific conference
"Tribology for Mechanical Engineering"
dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS

19-21 ноября 2018 года
Москва

[1] ОСТ 1 00536-78 Втулки свертные из металлофторопласта. Технические условия.
[2] Астахов М.Ф., Караваев А.В., Макаров С.Я. и Суздальцев Я.Я. «Справочная книга по расчету самолета на прочность», 708.
[3] ГОСТ 27674–88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
[4] «Силы трения и пластическое деформирование подшипника скольжения самолета.» Титов В.В. «Техника воздушного флота», № 3, 2012 г., «Трение и износ», том 33 № 6, ноябрь – декабрь 2012 г.

АЛМАЗОПОДОБНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

Тополянский П.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П.

E-mail: info@plasmacentre.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ООО «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия.

Рассмотрена актуальность использования тонкопленочных покрытий для упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры в связи с их критическим износом 0,2-5 мкм. Приведены результаты исследований физико-механических, трибологических свойств, испытаний на микроабразивный износ алмазоподобного покрытия DLCPateks (a-C:H-SiOCN), наносимого методом финишного плазменного упрочнения (PACVD).

Ключевые слова: плунжерная пара, инжектор, форсунка, восстановление, упрочнение, алмазоподобное покрытие.

DIAMOND-LIKE COATING FOR FUEL DETAIL PARTS HARDENING AND RENOVATION

Topolyansky P.A., Ermakov S.A., Topolyansky A.P.

The actuality of application of thin-film coatings for hardening and renovation of fuel equipment parts due to their critical wear 0.2-5 of microns is considered. The findings of investigations of physical and mechanical, tribological properties, tests for micro abrasive wear of the diamond-like coating DLCPateks (a-C:H-SiOCN), applied by the method of finishing plasma hardening, are presented (PACVD).

Keywords: plunger pair, injector, nozzle, recovery, hardening, diamond-like coating (DLC).

В связи с разработкой двигателей с минимальным выбросом вредных веществ, с уменьшенным расходом топлива и уровнем шума к топливной аппаратуре предъявляются повышенные требования по увеличению давления впрыска, точного распыления топлива и его эффективного сгорания, обеспечению длительного постоянства зазоров. Одновременно повышаются нормы экологичности и изменяются физико-химические свойства дизельного топлива (снижается содержание в нем сернистых соединений, что уменьшает его смазывающую способность). Такое сочетание факторов требует разработки и использования новых материалов деталей топливной аппаратуры и технологий их изготовления.

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

Повышенная надежность топливной аппаратуры обеспечивается высокой точностью изготовления входящих деталей с получением диаметрального зазора порядка 1-3 мкм между рабочими поверхностями. Это требование достигается применением сталей, которые после термической, химико-термической и обработки холодом обладают твердостью более HRC 60, хорошей шлифуемостью и способностью доводки поверхностей до параметра шероховатости *R*a 0,04-0,08 мкм.

Обеспечение максимально высокой твердости рабочих поверхностей деталей топливной аппаратуры связано с бытующим мнением адекватности их повышенной долговечности. В действительности же, при реальных условиях эксплуатации минимизация износа зависит от упругости и стойкости к деформациям поверхностного слоя не меньше, чем от твердости. Поэтому необходимыми условиями повышенной

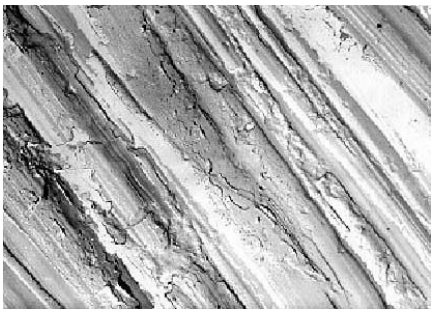
износостойкости являются максимальные значения критериев стойкости к упругой деформации (индекс пластичности), стойкости к пластической деформации и упругого восстановления. Управлять этими свойствами возможно нанесением тонкопленочных покрытий с оптимальными значениями твердости и модуля упругости и имеющими одновременно повышенные анти-фрикционные свойства (низкий коэффициент трения, минимальные длительность приработки, тепловыделение при трении, износ трущихся поверхностей). Дополнительно такие покрытия могут обеспечивать снижение уровня возникающих напряжений, залечивание поверхностных микродефектов, предотвращать растрескивание, минимизировать трибохимические эффекты, быть термостойкими и диэлектрическими. При этом выбор и использование покрытий основываются на обеспечении максимальной адгезии к подложке.

Основными технологическими процессами изготовления деталей топливной аппаратуры являются традиционные операции механической и термической обработки, обработки холодом, шлифования, полирования, хонингования и доводки. При этом важно отметить, что детали топливной аппаратуры, изготавливаемые из российского или импортного проката, принадлежащие одной партии, даже при использовании одного и того же материала, обработанные в тождественных условиях могут значительно различаться по долговечности. Это связывается с качеством исходного материала и последующей их термической обработкой (отличием химического состава, наличием неметаллических включений, пористости, карбидной и структурной неоднородности, крупнозернистостью, характером и структурой мартенсита закалки и т.д.). Чтобы минимизировать возможную дефектность основного материала целесообразно на заключительной стадии изготовления деталей наносить тонкопленочные покрытия.

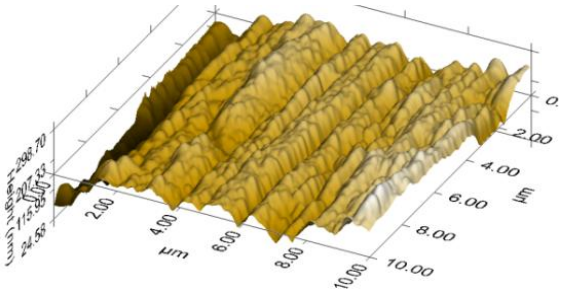
Окончательной операцией при изготовлении высокоточных деталей топливной аппаратуры является доводка алмазными порошками и пастами, в результате которой удаляются локальные прижоги и грубые риски, полученные в процессе шлифования. При этом после операций шлифования и доводки в поверхностном слое образуются, в основном, растягивающие остаточные напряжения, способствующие раскрытию микротрещин и приводящие к снижению усталостной прочности деталей. Даже сверхтонкая доводка любых кристаллических материалов не исключает дефектность поверхности и наличие микротрещин. Типичный вид поверхности после практически любой обработки с использованием абразивных материалов представлен на рис. 1.

Для создания в поверхностном слое сжимающих напряжений, обеспечивающих схлопывание микротрещин, целесообразно использовать специальную финишную обработку, например, химическое осаждение покрытий из паровой фазы (CVD процесс). Для залечивания поверхностных дефектов в процессах осаждения наиболее оптимальным является использование аморфных (стеклообразных) покрытий, так как применение «замороженной жидкости» позволяет максимально эффективно заполнять впадины шероховатой поверхности, залечивать микродефекты и трещины поверхностного слоя.

Детали топливной аппаратуры эксплуатируются в условиях повышенных нагрузок, скоростей и температур при контакте с поверхностно-активными соединениями топлива, в котором дополнительно могут содержаться микроабразивные частицы, влага и растворенные газы. Эти условия облегчают деформирование (пластифицирование) поверхностного слоя деталей трибосопряжений (эффект Ребиндера). При этом пленка топлива в условиях минимальных зазоров имеет тенденцию к разрыву, что приводит к схватыванию выступов одной поверхности трения с другой. С целью придания антисхватывающих свойств поверхностям трения целесообразно использовать химически инертные покрытия, например, алмазоподобные.



а



б

Рис. 1. **Топография поверхностного слоя стали ШХ15 с твердостью HRC 62 после операций шлифования и полирования: а – вид поверхности, полученный на электронном микроскопе при анализе снимков угольных реплик, увеличение - х5000, б - нанотопография поверхности, полученная сканирующей зондовой микроскопией**

Изучение влияния эксплуатационных факторов на износостойкость деталей топливных насосов может быть осуществлено в соответствии с международным стандартом EN 1071-6:2007 при испытаниях на микроабразивный износ [1].

Таким образом, в качестве оценки износостойкости деталей топливной аппаратуры в

зависимости от качества материалов и технологий их изготовления может служить анализ физико-механических свойств поверхностного слоя, трибологических характеристик в условиях трения скольжения и результатов испытаний на микроабразивный износ.

Для повышения износостойкости и возможности восстановления деталей топливной аппаратуры разработано алмазоподобное (DLC) покрытие системы a-C:H/a-SiOCN с использованием процесса финишного плазменного упрочнения (ФПУ), который относится к методам PACVD [2-4]. Процесс ФПУ основан на разложении паро́в жидких химических соединений с образованием газообразных углеводородов, вводимых в плазму дугового разряда. Нагрев изделий при ФПУ не превышает 150°С. В результате ФПУ на рабочих поверхностях образуется аморфное многослойное покрытие с низким коэффициентом трения, повышенной микротвердостью, химической инертностью, высокой жаростойкостью и диэлектрическими характеристиками. За рубежом активно применяются подобные алмазоподобные покрытия, содержащие кремний и его соединения, например, типа a-C: H: Si [5-7] и a-C:H/a-Si:O [8], наносимые методом PACVD. Покрытия имеют твердость порядка 16 ГПа, коэффициент трения - 0,02–0,06.

Анализ результатов наноиндентирования покрытия DLCPateks выявил, что с повышением нагрузки и, соответственно, с увеличением контактной глубины твердость уменьшается, что характеризует данное покрытие 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. 2 представлена диаграмма индентирования покрытия DLCPateks. Стойкость поверхностного слоя с данным покрытием к упругой деформации (индекс пластичности) H_{IT}/E_r составляет 0,14. Данное покрытие наносилось на подложку из стали ШХ15, имеющей модуль Юнга 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. 3 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.

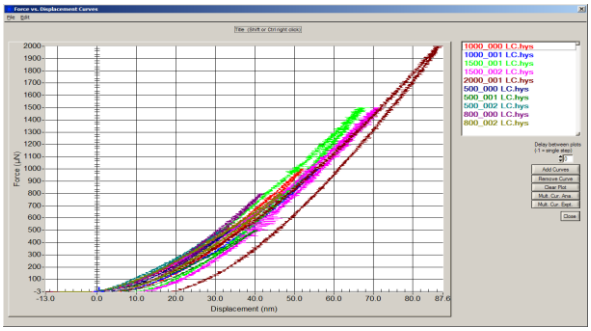


Рис. 2. **Диаграммы индентирования *F-h* при разных нагрузках покрытия DLCPateks (TI 750Ubi, Hysitron, США)**

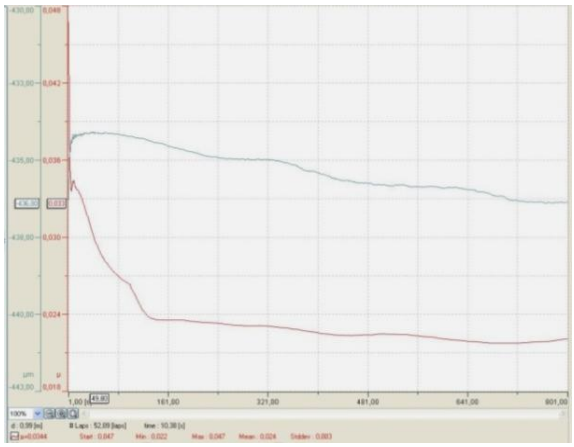


Рис. 3. **Изменение коэффициента трения со временем покрытия DLCPateks (TRB-S-DE, CSM-Instruments, Швейцария)**

Исследования на микроабразивное изнашивание 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.

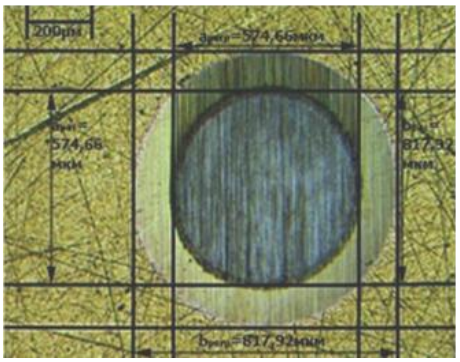


Рис. 4. **Микрофотография отпечатка покрытия DLCPateks после испытаний на микроабразивное изнашивание (Tribotester PC101, Плазмацентр, Россия)**

При ФПУ в связи с получением сжимающих напряжений на поверхности и нанесением покрытий толщиной 1-2 мкм в аморфном состоянии

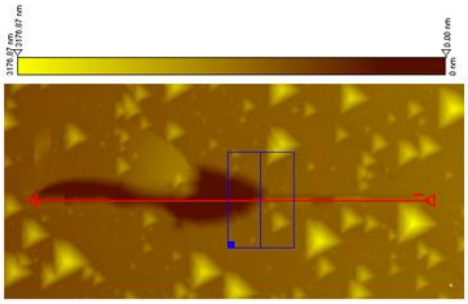


Рис. 5. **Трехмерный рельеф поверхности и царапины, полученной методом сканирующей зондовой микроскопии покрытия DLCPateks при определении нагрузки разрушения (нанотвердомер НаноСкан-3D, Россия)**

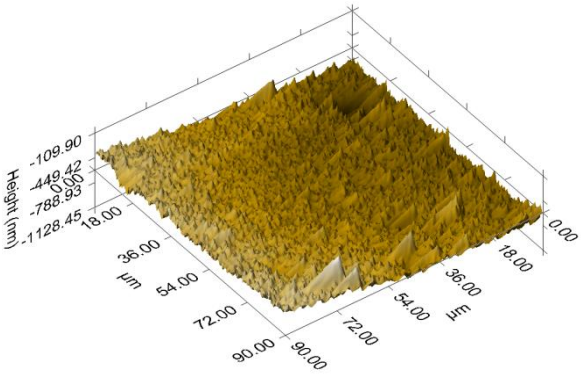
происходит залечивание дефектов и трещин (глубоких и узких впадин профиля) поверхностного слоя, образованных от предшествующих операций изготовления изделий. Это должно способствовать увеличению усталостной прочности деталей с покрытием.

Исследования, проведенные на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик показали, что после нанесения покрытия DLCPateks толщиной порядка 1 мкм (рис. 6, а) на поверхности полностью отсутствуют следы от предшествующей обработки (см. вид исходной поверхности на рис. 1, а). На рис. 6, б представлена нанотопография поверхности с покрытием DLCPateks, полученная методом сканирующей зондовой микроскопии. После нанесения покрытия полностью исчезли «гребни» чередования впадин и выступов рельефа (см. первоначальный вид рис. 1, б).

Экспериментальные стендовые испытания на соответствие допускам тест-планов доказали возможность использования технологии ФПУ с нанесением покрытия DLCPateks при упрочнении и восстановлении плунжеров, призм, штоков и клапанов мультипликатора, игл распылителя, клапанов форсунок топливных систем Common Rail, производимых фирмами Bosch, Delphi, Denso, Siemens, L'Orange, Cummins и др. (рис. 7).

Таким образом, одним из перспективных способов упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры является процесс ФПУ с локальным нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks, исключающим последующую абразивную обработку. Эффективность покрытия DLCPateks определяется его физико-механическими и трибологическими характеристиками, коэффициентом износа, обеспечением повышенной адгезии.

а



б

Рис. 6. **Вид поверхности после нанесения покрытия DLCPateks, x5000 (а), нанотопография покрытия DLCPateks (TI 750Ubi, Hysitron, США) (б)**

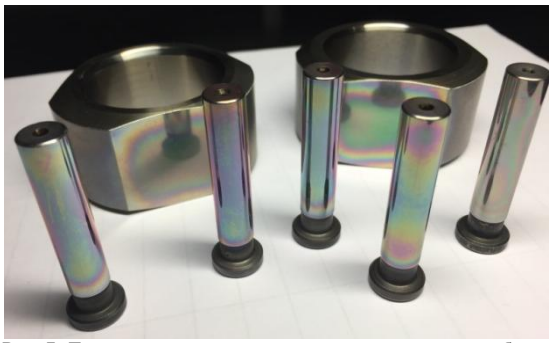


Рис. 7. **Детали топливной аппаратуры с алмазоподобным покрытием DLCPateks**

[1] Канаев А.Т., Тополянский П.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Сертификация материалов и покрытий по параметрам микроабразивного изнашивания // Вестник науки Казахского агротехнического ун-та им. С. Сейфуллина. 2017. №2 (93). С. 111-119

[2] Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та. 2013. - 406 с.

[3] Тополянский П.А., Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Исследования свойств нанопокрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. № 2, 2011. - С. 28-34

[4] Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Дунаев А.В., Поджарая К.С. Аттестация трибологических свойств упрочняющих тонкопленочных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8, С. 20-29

[5] Donnet C., Erdemir A. Tribology of Diamond-Like Carbon Films. 2008. - 664 p.

[6] 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

[7] Christoph P.O., Treutler C. Industrial use of plasma-deposited coatings for components of automotive fuel injection systems // Surface and Coatings Technology. 200 (2005). 1969-1975

[8] Lanigan J.L., Wang C., Morina A. et al. Repressing oxidative wear within Si doped DLCs // Tribology International, 2016. 93 (B). 651-659