# УПРОЧНЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗОЛОТНИКОВЫХ И ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

ПРИВЕДЕНА КОНЦЕПЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ. РАССМОТРЕН ПРОЦЕСС ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ (ФПУ) С НАНЕСЕНИЕМ АЛМАЗОПОДОБНОГО ПОКРЫТИЯ DLCPATEKS (A-C:H-SIOCN). ПРИВЕДЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, АМОРФНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ МИКРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ДАННОГО ПОКРЫТИЯ. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДТВЕРДИЛИ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ DLCPATEKS ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ, НАПРИМЕР СИСТЕМ ВПРЫСКА ТОПЛИВА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ COMMON RAIL, ПРОИЗВОДИМЫХ ФИРМАМИ BOSCH, DELPHI, DENSO, SIEMENS И ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ КОМПАНИЙ CUMMINS INC., MTU FRIEDRICHSHAFEN GMBH, DETROIT DIESEL CO., DEUTZ AG И ДРУГИХ.

Детали топливной аппаратуры испытывают практически все известные виды разрушений – усталостное, абразивное, кавитационное, эрозионное, коррозионное, электрохимическое и другие. Это приводит к образованию на рабочих поверхностях в локальных зонах выкрашиваний, царапин, задиров, к налипанию и наволакиванию частиц, схватыванию и заклиниванию трущихся деталей. Величина критического износа деталей топливной аппаратуры в большинстве случаев не превышает 0,2 - 5 мкм. Исходя из микронных значений износа, их упрочнение и восстановление возможны путём нанесения тонкоплёночных покрытий.

Выбор технологии упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры основывается как на получении заданных геометрических размеров, так и на основе анализа физико-механических и трибологических свойств поверхностного слоя, параметров шероховатости, распределения остаточных напряжений и параметров микроабразивного изнашивания. Данные характеристики после реализации технологии упрочнения или восстановления должны улучшаться.

Знание конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, связанных с износостойкостью, позволило сформулировать методологию выбора максимально эффективного процесса нанесения покрытий с целью упрочнения и восстановления деталей топливной аппаратуры:

- технология должна быть финишной и низкотемпературной, 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 неметаллическое покрытие (аморфное, диэлектрическое, химически инертное) с повышенной адгезионной прочностью к подложке, 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 ($\eta_{IT}$) 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, определяемый в условиях микроабразивного изнашивания 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 (Rpk) и основу профиля (Rk), должны иметь минимальные значения.

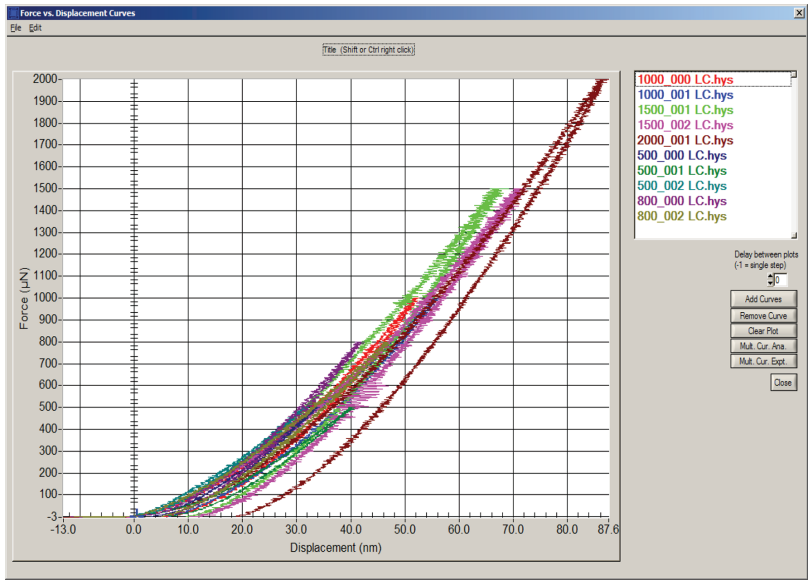


**Рис. 1.**
*Диаграммы индентирования F-h при разных нагрузках покрытия DLCPateks (нанотвёрдомер TI 750Ubi, Hysitron, США).*

В соответствии с данной концепцией выбора технологии повышения долговечности деталей топливной

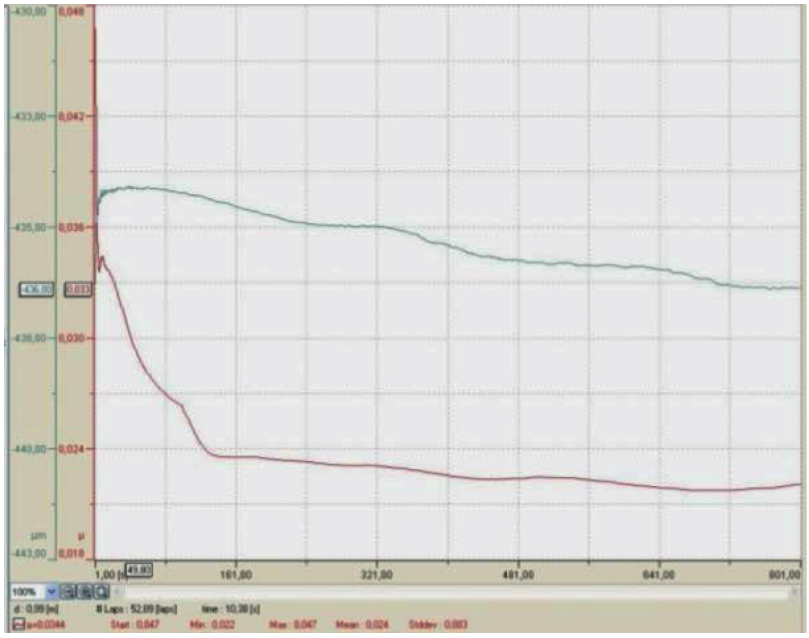

**Рис. 2.**
*Изменение коэффициента трения со временем покрытия DLCPateks (трибометр TRB-S-DE, CSM-Instruments, Швейцария).*

аппаратуры, рассмотрим метод финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks (a-C:H/a-SiOCN) [1]. 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 микротвёрдостью, 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, нанесённого с использованием технологии ФПУ. В качестве материала подложки использовалась термообработанная сталь ШХ15. Методики проведённых исследований подробно изложены [2 - 4].

Анализ результатов наноиндентирования выявил, что с повышением нагрузки и, соответственно, с увеличением контактной глубины твёрдость уменьшается, что характеризует покрытие DLCPateks как градиентное. В пределах одной нагрузки твёрдость изменяется от 14 ГПа до 23 ГПа, что свойственно многокомпонентным покрытиям. Усреднённые свойства покрытия DLCPateks: нанотвёрдость – 18 ГПа, модуль Юнга – 127 ГПа, упругое восстановление – 87 %. *На рис. 1* представлена диаграмма индентирования покрытия DLCPateks. Стойкость 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.

*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.

Исследования, проведённые 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 зёрен и дислокационных дефектов, обеспечивает максимально эффективное заполнение впадин профиля подложки.

Исследования на микроабразивное изнашивание проводились в соответствии с международным стандартом EN 1071-6:2007 при использовании шаров диаметром 30 мм из стали ШХ15 с твёрдостью

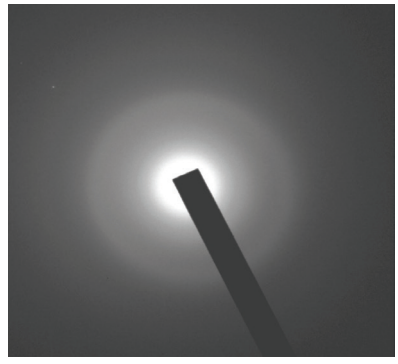

**Рис. 3.**
*Электронограмма покрытия DLCPateks, характеризующая его аморфность.*

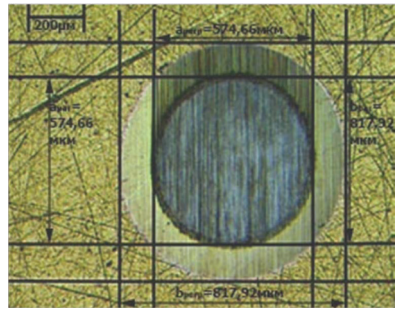


**Рис. 4.**
*Микрофотография отпечатка покрытия DLCPateks после испытаний на микроабразивное изнашивание (триботестер Tribotester PC 103, Плазмацентр, Россия).*

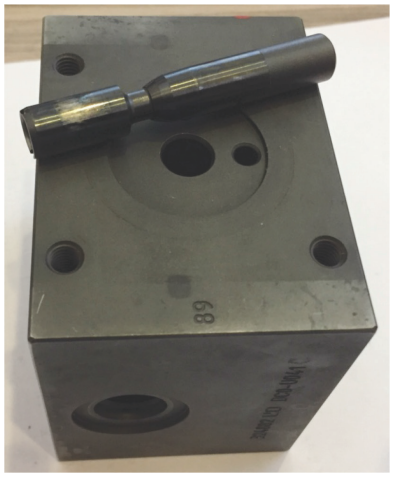

**Рис. 5.**
*Блок управления ТНВД (№ 23540850) двигателей MTU 16V4000 (MTU Friedrichshafen GmbH, Германия).*

**Рис. 6.**
*Форсунка (№ 4088427) двигателей Cummins QSK45 (Cummins Inc., США).*

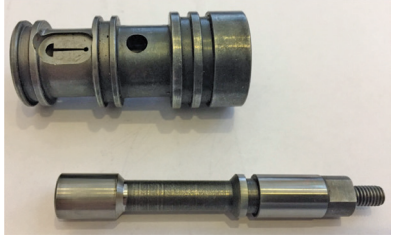

**Рис. 7.**
*Плунжерная пара подачи топлива ТНВД (№ 3077526) двигателей КТА 50, КТТА 38 (Cummins Inc., США).*

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 $7,61 \times 10^{-13}$ м³Н⁻¹м⁻¹. На *рис. 4* представлена микрофотография отпечатка подложки с покрытием.

**Рис. 8.**
*Детали топливной аппаратуры, восстановленные с использованием ФПУ с нанесением алмазоподобного покрытия DLCPateks.*

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 и др. В промышленных машинах 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. 5 - 9* представлены отдельные детали топливной аппаратуры, используемые для карьерных большегрузных самосвалов и машин повышенной проходимости марки БЕЛАЗ, восстанавливаемые путём нанесения тонкоплёночного покрытия DLCPateks методом ФПУ. Как показали производственные испытания, работоспособность восстановленных деталей сравнима по долговечности с новыми деталями.

***П. А. Тополянский**, канд. техн. наук,*
*генеральный директор НПФ «Плазмацентр»,*
*Санкт-Петербург.*

***ЛИТЕРАТУРА***

1. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2013. 406 с.
2. Шарифуллин С. Н., Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Финишное плазменное упрочнение и восстановление деталей топливной аппаратуры. Металлообработка. 2018. № 4 (106). - С. 28 - 39.
3. Канаев А. Т., Тополянский П. А., Тополянский А. П., Ермаков С. А., Бийжанов С. К., Решоткина Е. Н. Сертификация материалов и покрытий по трибологическим характеристикам. Вестник Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева. Сер. Технические науки и технологии. 2018. № 2 (123). - С. 73 - 81.
4. Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Испытания трибологических покрытий на микроабразивное изнашивание. Механика и трибология транспортных систем: сборник докладов международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 8 - 10 ноября 2016 г.: в 2 т. - Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. - 2016. - Т. 2. - С. 217 - 223.