

сварщиков Урала «Сварка Урала-2001», 27 фев. – 2 марта 2001 г. – Нижний Тагил: 2001. – С. 96.

3. Ивашко, В.С. Восстановление деталей нанесение покрытий электродуговым напылением / В.С. Ивашко, С.С. Шамович, К.В. Буйкус / Материалы междунар. научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», 28–30 мая 2002 г., г. Ялта. / Ассоц. технологов-машиностроителей Украины, Инж. центр сварочных технологий, Всеросс. НИИ технологии упрочнения. – Киев: АТМ Украины, 2002. – С. 61–63.

УДК 621.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ С УПРОЧНЯЮЩИМИ
АЛМАЗОПОДОБНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

**RESEARCH OF STRUCTURE OF COATINGS ON THE BASIS OF
DIAMONDLIKE CARBON AND THE FUNCTIONAL DIMENSIONS OF
DETAILS WITH THE STRENGTHENING DIAMONDLIKE COATINGS**

Ивашко В.С., доктор технических наук, профессор;
Буйкус К.В., кандидат технических наук, доцент
(Белорусский национальный технический университет)

Ivashko V., Doctor of Technical Science, Professor;
Buikus K.V., Candidate of Technical Science, Associate Professor
(Belorussian National Technical University)

Аннотация. *Исследованы функциональные размеры деталей плунжерных пар топливного насоса высокого давления дизельного двигателя с упрочняющими алмазоподобными покрытиями.*

Abstract. *The functional dimensions of details of plunger pairs of high pressure fuel pump of the diesel engine with the strengthening diamondlike coatings are researched.*

Введение

Покрытие на основе алмазоподобного углерода (АПУ) (DLC – diamondlike carbon) или «аморфного углерода» (а-С) благодаря своим уникальным свойствам соответствуют всем необходимым требованиям к упрочняющему покрытию на рабочей поверхности плунжера топливного насоса высокого давления дизельного двигателя: высокая твердость (до 100 ГПа), низ-

кие интенсивность изнашивания и коэффициент трения, высокое удельное сопротивление, химическая инертность и коррозионная стойкость, большой коэффициент теплопроводности.

Важными этапами создания технологии упрочнения плунжеров топливного насоса высокого давления являются проведение исследования функциональных размеров и формы деталей с упрочняющими алмазоподобными покрытиями и исследования структуры покрытий на основе алмазоподобного углерода. Результаты исследования позволят определить состояние поверхности деталей после нанесения алмазоподобного покрытия.

Методики исследования

В настоящее время существует ряд методов получения алмазоподобных пленок. Одним из наиболее эффективных является вакуумно-плазменное осаждение. Вакуумно-плазменное нанесение покрытий (катодно-дуговое осаждение) – это физический метод нанесения покрытий (тонких плёнок) в вакууме, путём конденсации на подложку (изделие, деталь) материала из плазменных потоков, генерируемых на катоде-мишени в катодном пятне вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода. Метод также известен под названиями: катодно-дуговое осаждение (англ. Arc-PVD), метод КИБ – катодно-ионной бомбардировки или, по-другому, метод конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (последнее – оригинальное авторское название создателей метода).

Схема процесса такова: [твердая фаза (графит)] => [пар] => [ионизированный пар] => [ускоренный поток ионов плазмы] => [твердая фаза (алмазоподобная пленка)].

Для интенсификации процесса эффективно использование импульсной генерации плазмы. Импульсное вакуумно-плазменное осаждение АПУ покрытий обеспечивает необходимые скорости осаждения при экономичности, стабильности процесса во времени и высокой воспроизводимости результатов. При импульсной генерации плазмы можно достичь высокой плотности и энергии частиц, а в осажденных пленках – низкого содержания примесей и сплошности пленок, начиная с нескольких монослоев. Импульсный режим не требует предварительного нагрева подложек для стимулирования миграции адсорбирующихся частиц и формирования высококачественных покрытий.

Для получения пленок алмазоподобного углерода была использована серийная установка вакуумного напыления УВНИПА-1-001 с газовым ионным источником ИИ-4-0,15 типа «Радикал», предназначенным для

очистки поверхности подложек ионами аргона, импульсным генератором плазмы с катодом из графита, фильтром очистки плазмы от макрочастиц.

В таблице 1 приведены значения параметров осаждения АПУ покрытий.

Измерения размеров и отклонений формы функциональных поверхностей пар производилось на универсальном измерительном центре УМС-850 фирмы Opton (Германия) методом прямого ощупывания измерительной головкой по заданной программе. Первичный преобразователь (датчик) оснащён рубиновыми наконечниками с дискретностью отсчёта $\pm 0,0005$ мм.

Таблица 1 – Параметры режима осаждения углеродных покрытий из плазмы импульсного катодно-дугового разряда

Параметр режима осаждения	Значение для образца	
	1	2
Напряжение разряда, В	200	300
Амплитуда тока импульса, А	2000	2000
Время импульса, с	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Напряжение на электродах поджига, В	700	700
Напряжение на дополнительном аноде, В	300	300
Частота генерации импульсов, Гц	5	5
Расстояние от торца катода до подложки, мм	100	100

Параметры микрогеометрии исследовались системой Talysurf-6 в «критических сечениях» сопряжения. Оценка велась по 25 параметрам шероховатости с последующим выбором наиболее показательных и характерных /1, 2/.

Измерения размеров и отклонений формы осуществлялось в сечениях I-I, II-II и III-III, перпендикулярных геометрической оси и расположенных соответственно на расстояниях 2, 22 и 40 мм от рабочего торца плунжера (рисунок 1).

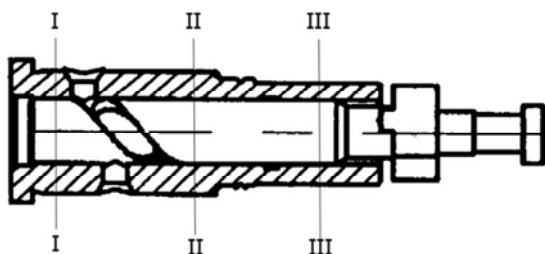


Рисунок 1 – Схема расположения сечений, на которых проводились измерения

Структура поверхности пленки исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии – разновидностью электронной микроскопии, в которой для зондирования исследуемой поверхности используется сканирование по ней сфокусированного пучка электронов. Для исследования применялся сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения MIRA (разрешение 1,5 нм)

Для анализа структуры АПУ покрытий по всей их толщине был применен метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), использующего связь между частота и интенсивность поглощения отдельной C–связи с состоянием атома углерода (тип его электронной гибридизации sp^3 , sp^2 или sp).

Алмазоподобные покрытия состоят из атомов углерода как с алмазными, так и с графитоподобными связями. Структура алмаза представляет собой структуру с бесконечным трехмерным комплексом или каркасную структуру (гигантская трехмерная макромолекула). В алмазе все атомы имеют sp^3 -гибридизацию связи, и все электроны локализованы на этих гибридных орбиталях. Структура графита представляет собой структуру с бесконечным двухмерным комплексом или слоистую структуру (плоские бесконечные молекулы, слабосвязанные между собой). В графите существует sp^2 -гибридизация связей между атомами углерода. В таблице 2 приведены частоты отдельных валентных колебаний C–групп.

Спектры комбинационного рассеяния света регистрировались с помощью автоматизированного спектрометрического комплекса на базе Ramalog-4 фирмы SPEX. Для возбуждения использовалось излучение аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм, которое свободно может проникать в АПУ покрытие, мощность составила 100 мВт при диаметре сечения светового пучка менее 10 мкм. При исследованиях для всех образцов устанавливались одинаковые режимы записи спектров, что обеспечивало достоверность сравнения полученных результатов.

Таблица 2 – Частота отдельных валентных колебаний C–групп

Тип связи	Частота ν , cm^{-1}
C = C- sp^2 (тригональный графитовый тип)	1380
C = C- sp^3 (тетрагональный алмазный тип кристаллической решетки)	1560

Результаты исследования

Результаты измерений функциональных размеров деталей плунжерных пар с упрочняющими алмазоподобными покрытиями приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерений функциональных размеров деталей плунжерных пар с упрочняющими алмазоподобными покрытиями

Параметр	Условный порядковый номер пары			
	1		2	
	втулка	плунжер	втулка	плунжер
1. Диаметр в сечении пары, мм:				
I-I	10,063	10,0595	10,062	10,0590
II-II	10,063	10,0590	10,062	10,0590
III-III	10,062	10,0590	10,062	10,0590
2. Зазор в паре на сторону, мкм:				
наибольший	2,00		1,50	
наименьший	1,50		1,50	
средний	1,75		1,50	

Анализ данных измерения, представленных в таблице 3, показывает, что размеры втулки и плунжера на функциональной длине практически постоянны в пределах 1 мкм. Зазор в парах колеблется в допустимых пределах 1,5...1,75 мкм.

Результаты измерений микрогеометрии поверхности деталей плунжерных пар с упрочняющими алмазоподобными покрытиями приведены в таблице 4.

Среднее значение параметра шероховатости R_a , наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , высота неровностей профиля по 10 точкам R_z у каждой детали из пары практически одинаковы. Однако, если сравнить эти между плунжером и втулкой, то видно, что у плунжера значения указанных параметров в 1,4-1,5 раза выше. Это объясняется грубым профилем нанесенного алмазоподобного покрытия.

Средний шаг местных выступов профиля S у втулки изменяется в пределах 7,53–7,8 мкм, а у плунжера 8,17–9,48 мкм.

Относительная опорная длина профиля на глубине 0,10 мкм tr плунжера является большей, то есть имеет более грубый профиль.

Средний квадратический наклон профиля Δq характеризует тангенс угла наклона профиля в пределах базовой длины. Значения у плунжеров больше. Профили у втулок более сглаженные, чем у плунжеров. Это коррелируется и со средним шагом местных выступов.

На рисунке 2 приведено изображение косога среза под углом 5° покрытия толщиной 2,5 мкм, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Как видно, преимущественная ориентация частиц отсутствует, средний размер кристаллитов составляет менее 0,01 мкм.

Таблица 4 – Результаты измерений микрогеометрии поверхности деталей плунжерных пар с упрочняющими алмазоподобными покрытиями

Параметр	Условный порядковый номер пары			
	1		2	
	втулка	плунжер	втулка	плунжер
1. Высотные параметры, мкм:				
– среднее арифметическое отклонение профиля R_a	0,0223	0,0327	0,0223	0,0340
– наибольшая высота неровностей профиля R_{max}	0,323	0,390	0,323	0,378
– высота неровностей профиля по 10 точкам R_z	0,237	0,378	0,237	0,369
2. Шаговые параметры, мкм:				
– средний шаг местных выступов профиля S	7,8	8,17	7,53	9,48
3. Переходные параметры:				
– относительная опорная длина профиля на глубине 0,10 мкм $t_p, \%$	22	35	21	36
– средний квадратический наклон профиля Δq	1,07	1,87	0,93	1,80

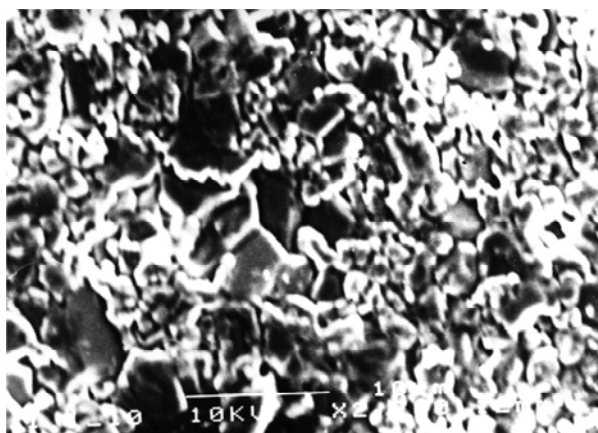


Рисунок 2 – Углеродная пленка

На рисунке 3 представлены спектры КРС для АПУ пленок.

При изменении условий получения пленок максимумы полос $\sim 1560 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 1380 \text{ см}^{-1}$ в спектре КРС оставались без изменения, изменяется лишь интенсивность сигнала.

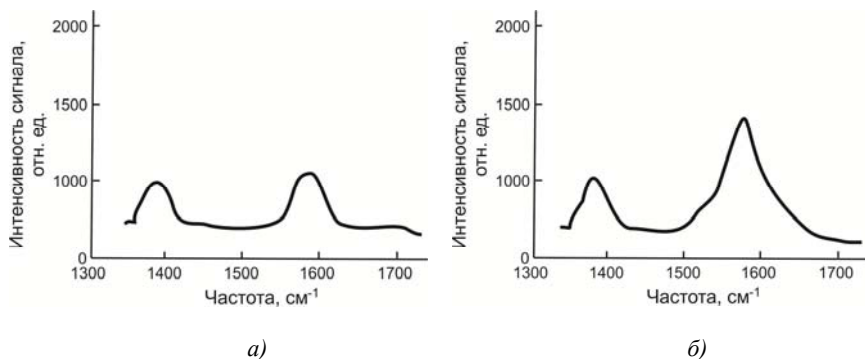


Рисунок 3 – Спектр КРС АПУ покрытия при напряжении разряда:
а) 200 В; б) 300 В

Сравнив спектры, можно увидеть, что в спектре КРС для АПУ пленки, полученной при напряжении разряда 300 В, наблюдается рост интенсивности.

Соотношение алмазоподобных и графитоподобных связей в покрытии определяются по площади под кривыми на рисунок 3 и приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Соотношение алмазоподобных и графитоподобных связей в покрытии

Напряжение разряда, В	Доля алмазоподобных и графитоподобных связей sp^3 : sp^2 , %
200	51 : 49
300	68 : 32

Повышение напряжения разряда до 300 В интенсифицирует появление алмазоподобных структур со связями sp^3 .

Заключение

Проведено исследование функциональных размеров деталей плунжерных пар топливного насоса высокого давления дизельного двигателя с упрочняющими алмазоподобными покрытиями.

Нанесенное алмазоподобное покрытие вакуумно-плазменным осаждением с импульсной генерацией плазмы обладает практически теми же геометрическими характеристиками, что и основная поверхность, то есть покрытие не требует последующей механической обработки.

Структура поверхности пленки без преимущественной ориентации частиц, средний размер кристаллитов составляет менее 0,01 мкм.

При изменении условий получения пленок максимумы полос $\sim 1560 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 1380 \text{ см}^{-1}$ в спектре КРС оставались без изменения, изменяется лишь интенсивность сигнала.

Повышение напряжения разряда до 300 В интенсифицирует появление алмазоподобных структур со связями sp^3 . Так соотношение алмазоподобных и графитоподобных связей в покрытии $\text{sp}^3:\text{sp}^2$ в процентах для покрытий, наносимых при напряжения разряда 200 В, составляет 51:49, а для покрытий, наносимых при напряжения разряда 300 В, – 68 : 32.

Упрочнение быстроизнашивающихся прецизионных деталей топливной аппаратуры позволит значительно повысить срок их службы. Результаты работы будут интересны как предприятиям, производящим детали топливной аппаратуры, так и предприятиям, ремонтирующим указанные детали.

Литература

1. Система Talysurf-6 для измерений и анализа поверхностной структуры материалов и изделий. Руководство по эксплуатации. – Англия, фирма Rank Taylor Hobson, 1984. – 85 с.
2. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Издательство стандартов 1990. – 10 с.
3. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 12 с.
4. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

УДК 621.7

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ГАЛЬВАНОМЕХАНИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ RESTORATION OF THE PLUNGER PAIRS BY GALVANOMECHANICAL APPLYING OF COATINGS

Ивашко В.С., доктор технических наук, профессор;
Буйкус К.В., кандидат технических наук, доцент
(Белорусский национальный технический университет)

Ivashko V., Doctor of Technical Science, Professor;
Buikus K.V., Candidate of Technical Science, Associate Professor
(Belorussian National Technical University)

Аннотация. На основании анализа существующих устройств для гальваномеханического осаждения покрытий предложен новый способ, заклю-