УДК 530 (075.8)

Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа

М. Б. Мяконьков, В. Б. Хмелевская

Ключевые слова: плазменное напыление, поршневое кольцо, трение.

Узел трения «поршневые кольца — втулка цилиндра»

При проектировании узлов механизма необходимо установить его физическую сущность и причины изнашивания деталей узлов механизма. Узел «поршневые кольца — втулка цилиндра» обеспечивает уплотнение камеры сгорания для того, чтобы исключить утечку рабочего тела в картер и проникновение масла и картерных газов в камеру сгорания. Герметичность камеры сгорания напрямую влияет на развиваемую мощность двигателя, его пусковые свойства, удельный расход топлива. Мощность, развиваемая двигателем, зависит от давления в камере сгорания, которое измеряется манометрическими датчиками. Изменение работоспособности узла «поршневые кольца — втулка цилиндра» зависит от износа колец, основной причиной которого является трение. На износ при трении влияют механические воздействия, коррозионная стойкость, сочетания энергетических параметров структур сопряженных материалов. Износ I при трении определяется по формуле

$$I = f(p,\ T,\ S_к/(P_{сх},\ \sigma_к,\ T_{пл1}/T_{пл2},\ \sigma_а,\ K_{тр})),$$

где p — давление в узлах трения; T — температура в узле трения; $S_к$ — площадь контакта сопряженных пар; $P_{сх}$ — нагрузка схватывания; $\sigma_к$ — когезионная прочность; $T_{пл1}$, $T_{пл2}$ — температуры плавления сопряженных пар (материала покрытий поршневого кольца и материала втулки цилиндра); $\sigma_а$ — адгезионная прочность; $K_{тр}$ — коэффициент трения. По энергетической теории трения износ определяется

$$I = \text{const}\ N/P_{сх}{}^n,$$

где N — нагрузка; n — показатель степени (зависит от сопряженных пар).

Кольца изготавливают из стали 65Г, стали 45 и чугуна, на них наносят разные покрытия. На износостойкость влияют следующие параметры:

- давление;
- температура в узле сопряжения;
- коэффициент трения;
- нагрузка схватывания;
- когезионная прочность;
- соотношение адгезии покрытия с основным металлом и адгезии покрытия с сопряженной парой, определяемое с учетом нагрузки схватывания;
- соотношение структур покрытия и материала сопряженной пары;
- напряженное состояние;
- соотношение параметров шероховатости сопряженных пар в зависимости от когезионной прочности;
- отношение мощности воздействия к мощности поверхности детали.

На износ сопряжения «поршневое кольцо — втулка цилиндра» оказывают воздействие:

- геометрия кольца;
- материалы, из которых изготовлены кольца и втулки;
- конструкция кольца;
- материал покрытия.

Для работоспособности поршневых колец с втулками из чугуна СЧ 25, хромистого чугуна и стали 38ХМЮА применяются различные покрытия. В настоящее время для повышения износостойкости узла «поршневое кольцо — втулка цилиндра» используются гальванические покрытия, плазменные покрытия и покрытия лазерной наплавкой.

Метод гальванического нанесения покрытий

При использовании гальванического метода нанесения покрытия требуется изготовить специальные ванны. Кроме того, токсичность электролита и необходимость строительства

Таблица 1

Свойства плазменных покрытий

Параметр	Материал покрытия		
	ПХ20Н80	C_2CrNi	ПН85Ю15 + CrC
Сопряженная пара	Чугун	Чугун	38ХМЮА
Нагрузка схватывания $P_{сх}$, кг	300	350	300
Нагрузка разрушения $P_р$, кг	220	300	350
Когезионная прочность $\sigma_к$, МПа	220	200	350
Коэффициент трения $K_{тр}$	0,06	0,065	0,08
Кавитационный износ, мг	8	4	3
Коррозионная стойкость, мг	2,6	5,0	2,0
Напряженное состояние поверхности $\sigma_н$, МПа	–150	–120	–100
Количество циклов до разрушения при нагрузке при термоциклировании $N_т \times 10^6$, ед.	8	2	2
Количество циклов до разрушения при нагрузке до 200 кг $N_ц \times 10^6$, ед.	5	4	3
Твердость по Бринеллю НВ	42	60	42
Угол смачивания, град.	50	45	50
Износ I, мм	0,01	0,02	0,01
Износ сопряженной пары, мм	0,01	0,03	0,02
Теплопроводность λ, кал/(см · с · град)	0,08	0,03	0,07
Пористость, %	10	5	5

очистных сооружений существенно ограничивают область применения данного метода. Наиболее широкое применение в области изготовления и ремонта колец нашли процессы хромирования. В Центральном научно-исследовательском дизельном институте (ЦНИДИ) для уменьшения износа колец разработан процесс плазменного напыления покрытия ПХ20Н80 и ПН85Ю15 с вводом молибдена, который использовался на заводе «Русский дизель». В Волжской академии водного транспорта проводили исследования для повышения износостойкости поршневых колец с применением материалов ПН85Ю15, ПГСР-3 (ПН73Х16С3Р3) [2].

Как показали исследования в ЦНИДИ и Волжской государственной академии водного транспорта, основными причинами изнашивания поршневых колец являются:

- трение;
- фреттинг;
- свойства нагара;
- механические свойства покрытий колец;
- усталостная прочность [2, 5].

Теоретические основы трения показывают, что на износ влияют:

- энергетические параметры сопряженных пар;
- нагрузка схватывания;
- коэффициент трения;
- момент трения.

Сравнительные исследования свойств покрытий на поршневых кольцах, нанесенных способом плазменного напыления, проведены в ЦНИИДИ, Волжской академии водного транспорта, Санкт-Петербургском государственном университете водных коммуникаций. При выборе материалов покрытия были использованы исследования свойств покрытий с сопряженной парой из чугуна и стали (табл. 1, 2) [3].

Профессор СПГУВК, д-р техн. наук Л. И. Погодаев провел исследования плазменных покрытий применительно к повышению износостойкости поршневых колец в условиях жесткого

Таблица 2

Исследования виброконтактного взаимодействия

Материал сопряженных пар	Износостойкость при различных частотах, мкм		
	относительная		средняя
	Частота колебаний ω = 150Гц	Частота колебаний ω = 8кГц	
C_2CrNi — СЧ 25	6,4	5,45	~6,00
ПН85Ю15 — СЧ 25	1,5	3,75	2,63
ПХ20Н80 — СЧ 25	1,3	1,45	1,37

Примечание: Относительная износостойкость рассчитывается по формуле: $k_{\Delta G СЧ} = \Delta G_i / \Delta G_{СЧ\ 25}$, где ΔG_i — износостойкость покрытия; $\Delta G_{СЧ\ 25}$ — износостойкость чугуна СЧ 25. Условия испытаний: давление p — 0,05 МПа, амплитуда колебаний A — 100 мкм, продолжительность t — 4 ч.

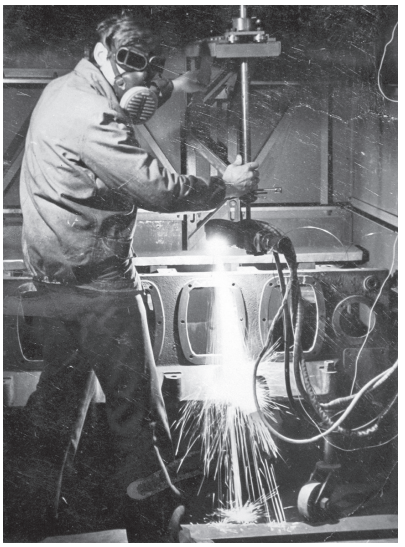

Рис. 1. Процесс нанесения покрытия плазменным напылением

виброконтактного взаимодействия с чугунной втулкой (см. табл. 2). Процесс нанесения покрытий плазменным напылением приведен на рис. 1.

Процесс нанесения покрытий ОПФПС

В настоящее время для поверхностного упрочнения деталей в НПФ «Плазмацентр» и СПбГПУ разработана технология осаждения из паровой фазы плазменной струи (ОПФПС) кремнийсодержащих реагентов. Схема установки ОПФПС приведена на рис. 2. Под давлением аргона реагент из колбы подается в плазменную струю, испаряется и осаждается на поверхность детали.

Нами проведены сравнительные исследования триботехнических характеристик покрытий, нанесенных методом гальванизации, на базе ОАО «Клинцовский завод поршневых колец», покрытий, нанесенных плазменным напылением в СПбГПУ, и покрытий SiC_2OH по технологии ОПФПС в лаборатории «Плазмацентра». Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 со смазкой маслом М14В2 в количестве двух капель в минуту (ТУ 38.101807–80) (рис. 3). Из колец вырезались образцы и вставлялись в оправку. Данные испытания проводились в сопряжении исследуемого покрытия с роликом из чугуна ∅42 мм, образец показан на рис. 4. Данные триботехнических исследований приведены на графиках (рис. 5).

Эти исследования показали, что момент трения при нагрузке 50 кг у гальванического покрытия составляет 13–15 кг · см, при нагрузке 100 кг наблюдается схватывание. У плазменного покрытия момент трения при нагрузке 50 кг такой же, как у гальванического; при нагрузке

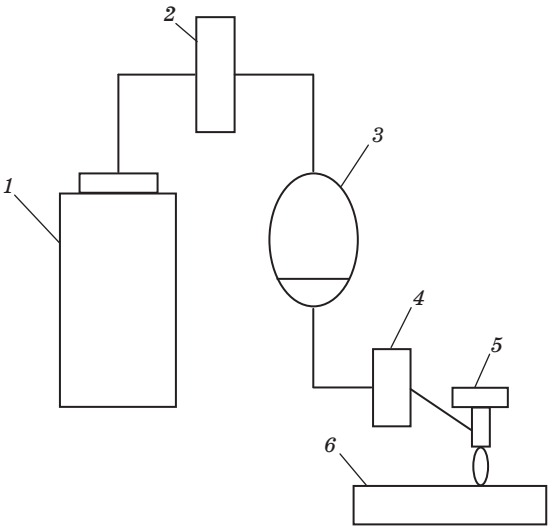

Рис. 2. Схема установки осаждения реагента из паровой фазы плазменной струи:

1 — баллон с аргоном; *2, 4* — ротаметр; *3* — колба с кремнеуглеродистым реагентом; *5* — плазмотрон; *6* — изделие

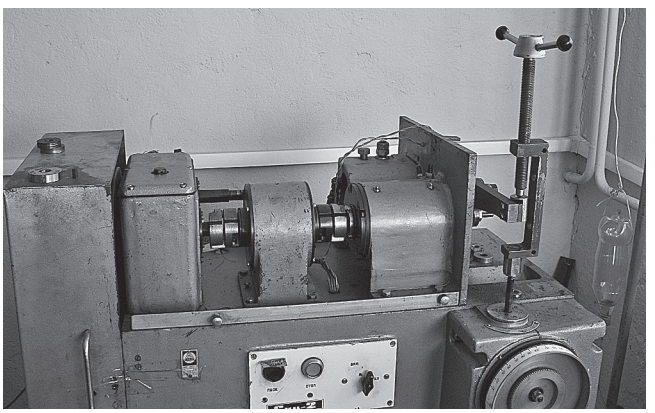

Рис. 3. Машина трения СМЦ-2

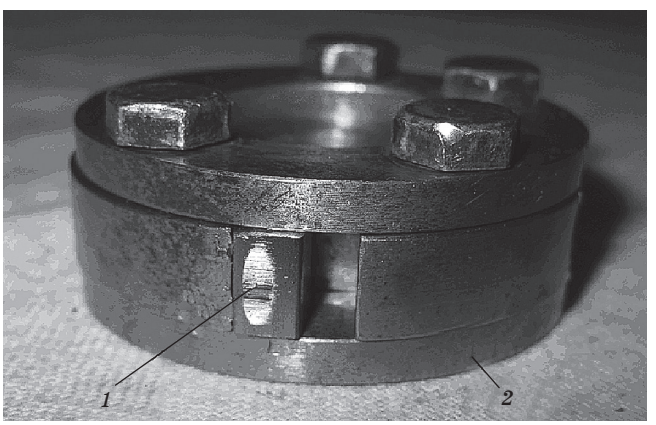

Рис. 4. Образец кольца *1* в оправке *2* для испытаний на машине трения

100 кг схватывания не наблюдается; при нагрузке 150 кг момент трения — 17 кг · см, проявлялось схватывание. При нагрузках 50

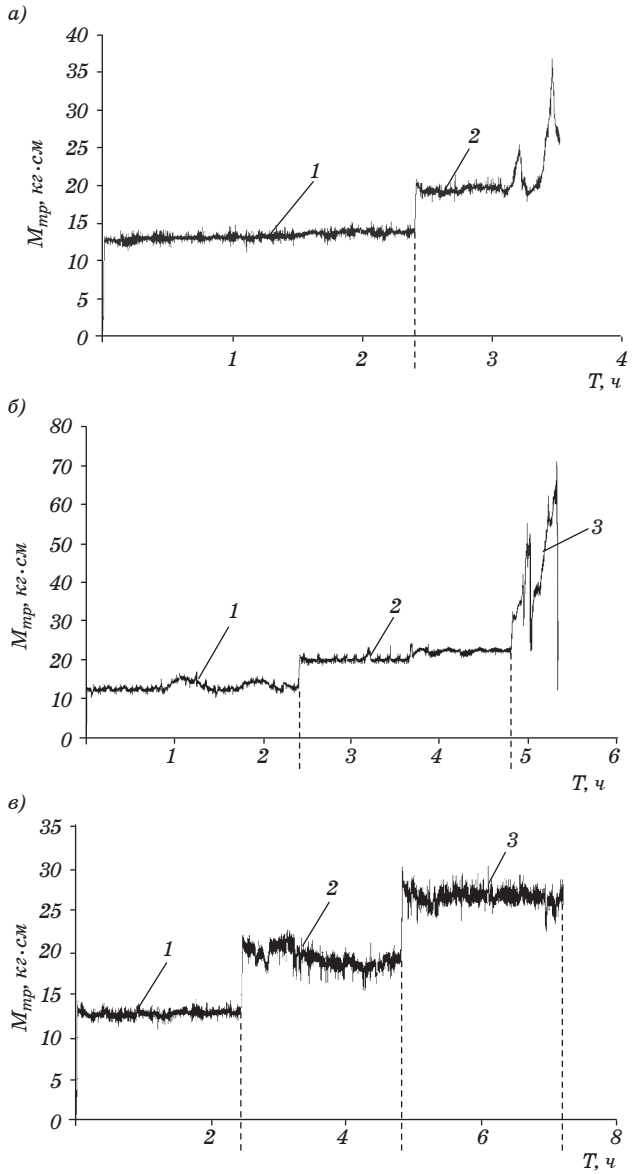

Рис. 5. Зависимость момента трения $M_{тр}$ от нагрузки и времени воздействия: *а* — гальваническое покрытие; *б* — плазменное покрытие; *в* — покрытие по технологии ОПФПС;

1 — 50 кг; *2* — 100 кг; *3* — 150 кг

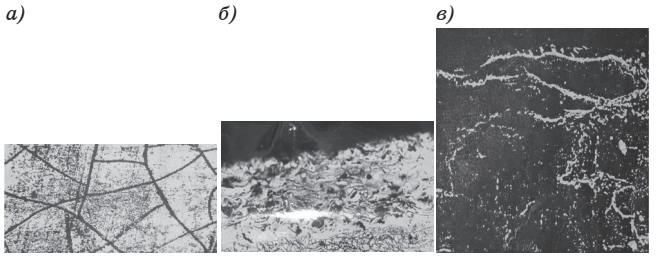

Рис. 6. Структура покрытий из разных материалов: *а* — гальванический хром; *б* — материал C_2CrNi; *в* — материал SiC_2OH

и 100 кг покрытие по методу ОПФПС имело момент трения 12–14 и 27 кг · см соответственно. Покрытие, нанесенное по технологии ОПФПС, демонстрирует более высокие показатели. Ниже показаны структуры покрытий из хрома, нанесенного гальваническим методом (рис. 6, *а*), плазменным напылением материала C_2CrNi (рис. 6, *б*), а также покрытия SiC_2OH (рис. 6, *в*).

На рис. 6, *а* приведена крупнозернистая структура. Рентгеноструктурный анализ показывает аморфизированную структуру с мелкозернистыми кристаллами SiC_2OH (рис. 6, *в*).

Выводы

Данные испытаний показали, что покрытие из кремнийорганического вещества, нанесенное методом ОПФПС, проявляет более высокие триботехнические характеристики и износостойкость на машине трения, чем плазменное напыление ПХ20Н80 и хромистые покрытия. Как подтверждают данные исследований триботехнических характеристик, трение в основном зависит от структур сопряженных пар.

В настоящее врем в СПГУВК проводятся исследования покрытий, нанесенных плазменным напылением с ультразвуковой обработкой на образцы из стали 45. При испытании покрытий из порошка АО-20 образцы демонстрируют более высокие триботехнические характеристики. Рентгеноструктурный анализ показывает, что при определенной конструкции волновода можно получить плазменное покрытие с мелкодисперсной структурой или аморфизированную структуру. Пока не удалось добиться стабильного получения наноструктурированных покрытий, но возможность образования мелкодисперсной структуры с характерным размером частиц 1–10 нм уже подтверждена на практике. В настоящее время в СПГУВК ведутся работы по совершенствованию процесса.

Литература

1. **Кондратьев Н. Н.** Отказы и дефекты судовых дизелей. М.: Транспорт, 1985. 150 с.

2. **Матвеев Ю. И.** Повышение долговечности деталей судовых дизелей с использованием плазменного напыления и лазерной обработки: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2003. 40 с.

3. **Хмелевская В. Б., Кузьмин А. А.** Принцип выбора технологий и материалов для повышения надежности судового оборудования. СПб.: Изд-во СПГУВК, 2005. 214 с.

4. **Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Дудко П. П.** Повышение надежности трибосопряжений. СПб.: Академия транспорта РФ, 2001. 304 с.

5. **Никитин М. Д.** Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей. М.: Машиностроение, 1974. 170 с.