

УДК ???

Использование трибологических нанопокровтий на основе соединений кремния для повышения ресурса и надежности поршневых колец

А. О. Горленко, П. А. Тополянский, А. П. Тополянский, С. А. Ермаков

Рассмотрены условия работы и виды износа поршневых колец и канавок под них в поршне, технологии их изготовления и упрочнения. Приведены характеристики многослойного покрытия SilcoKlean™ 1000 от корпораций Restek и SilcoTek (США) из аморфного гидрогенизированного кремния с верхним слоем из оксикарбонитрида кремния, используемого против углеродистых отложений от сгораемого топлива на поршневых кольцах и поршнях двигателей. Предложена концепция выбора технологии и материалов покрытий для упрочнения поршневых колец, на основании которой в целях уменьшения расхода топлива и масла, снижения выброса токсичных веществ с выхлопными газами, уменьшения шума, достижения максимально возможной мощности и долговечности двигателя предложено использовать технологию финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением многослойного нанопокровтия на основе соединений кремния SilcoPateks (α -Si:H-SiOCN). Для оценки свойств поверхностей до и после ФПУ и нанесения покрытия SilcoPateks приведены результаты исследований трибологических свойств нормализованным методом при трении скольжения, а также испытаний на микроабразивный износ в соответствии с международным стандартом EN 1071-6:2007. Результаты исследований подтвердили эффективность технологии ФПУ и покрытия SilcoPateks по трибологическим характеристикам и износостойкости в условиях микроабразивного изнашивания.

Ключевые слова: поршневые кольца, финишное плазменное упрочнение, кремниевое покрытие, углеродистые отложения, трибологические испытания, микроабразивный износ.

Поршневые кольца относятся к деталям цилиндропоршневой группы и широко применяются в автомобильных, мотоциклетных, мотороллерных, мопедных двигателях, а также в тракторных, комбайновых, тепловозных и судовых дизелях, компрессорах, дизельных молотах и других устройствах. Основное назначение поршневых колец: уплотнение камеры сгорания в целях исключения утечки отработанных газов, равномерное распределение масляной пленки по стенкам цилиндра, отвод излишков масла, препятствие проникновения масла из картера двигателя в камеру сгорания, отвод значительной части воспринимаемой поршнем теплоты в стенки цилиндра и систему охлаждения [1–5]. Поршневые кольца (компрессионные и маслосъемные) определяют развиваемую мощность устройства, его

пусковые свойства, удельный расход топлива и масла. Их износ, а также износ посадочных канавок под них в поршне вызывают усиленную утечку газов и, как следствие, повышенный расход масла, снижение компрессии, увеличенный расход топлива, повышенный шум и вибрацию, поэтому разработка новых технологий повышения их надежности и долговечности является актуальной задачей.

Условия работы поршневых колец и канавок под них в поршне и виды их износа

Уплотняющее действие компрессионных поршневых колец обеспечивается прижатием их к цилиндру (силой собственной упругости

колец и силой давления газов) и к стенкам поршневых канавок (силой давления газов, проникающих через зазоры). Верхнее компрессионное кольцо имеет наибольший износ, так как прижимается с наибольшей силой к цилиндру, находится в зоне более высоких температур и в худших условиях смазки. При обратном движении поршня изменяются усилия прижатия поршневых колец к цилиндру и осуществляется радиальное перемещение колец. Помимо радиальных и осевых движений, кольца могут вращаться относительно оси поршня. Постоянное изменение положения и нагрузок на кольца ведет к износу как самого кольца, так и поверхностей канавок поршня, при этом плотность посадки кольца в канавке нарушается, часть газов вытекает и уплотняющее действие кольца падает, происходят прорывы газов, перегрев кольца и канавки поршня. Рост температур поверхностей канавки создает условия для коксования масла в нем, приводящего к заклиниванию кольца и полной потере его уплотняющих свойств. Кроме этого, поверхности колец находятся в коррозионной среде, образуемой при сгорании топливо-воздушной смеси в цилиндрах двигателя, элементный состав которой зависит от компонентов, входящих в состав топлива. При сгорании рабочей смеси образуются углекислый газ, окись углерода, кислород, водяной пар, сернистые и другие соединения. Газы окисляют поверхности колец, образуя с элементами металла химические соединения. При понижении температуры стенок цилиндра ниже точки росы продуктов сгорания на поверхностях колец конденсируются пары, образующие с газами кислоты, например угольную и серную. Образованию серной кислоты содействует также повышенное содержание сернистых соединений в горючем и загрязненном атмосферном воздухе. Для защиты от коррозии цилиндра и поршневых колец, изготавливаемых из чугуна, применяются щелочные нейтрализующие присадки, представляющие собой металлоорганические соединения. Одновременно они снижают накопление в масле кислот, вызывающих коррозию деталей, выполненных из сплавов цветных металлов (например, поршней).

Износ поршневых колец связан с воздействием высокотемпературного газового пото-

ка, коррозионным воздействием химических соединений, образуемых при сгорании топливно-воздушной смеси, трением по цилиндру в условиях граничной смазки при циклических нагрузках и повышенных температурах, ударными нагрузками торцовых поверхностей колец о стенки канавки поршня, радиальным, осевым и вращательным движениями кольца в поршневой канавке. Видами износа колец и канавок под них в поршне на основании молекулярно-механической теории изнашивания являются [6]:

- износ за счет трения скольжения металл по металлу (радиальной поверхности кольца);
- эрозионный износ газовым потоком (торцевой поверхности кольца и поверхностей канавок);
- ударно-абразивный износ в условиях повышенных температур (торцевой поверхности кольца и двух поверхностей канавок);
- усталостный износ в условиях циклических нагрузок (всех поверхностей);
- микроабразивный износ пылевидными частицами и продуктами износа (всех поверхностей);
- окислительный износ агрессивной газовой средой продуктов сгорания (всех поверхностей).

Существующие технологии изготовления и упрочнения поршневых колец и поршней

Поршневые кольца изготавливаются в основном из специальных серых чугунов с пластинчатым графитом или высокопрочных чугунов с шаровидным графитом, поршни — из алюминиевых сплавов или специального чугуна. Технология изготовления поршневых колец — литье заготовки, механическая обработка, шлифовка. Поршни из алюминиевых сплавов изготавливают литьем или изотермической штамповкой с последующей механической, термической обработкой и шлифовкой.

Для повышения ресурса на рабочие поверхности поршневых колец мировые производители наносят различные покрытия [7–13]:

- гальванические [полученные хромированием, оловянированием, фосфатированием,

хромо-керамические ($\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$, SiC) — CKS-36, SCKS-36, хром-алмазные — GDC-50 и др.];

- газотермические (молибденовые, феррооксидные, на никелевой и железной основах, керамические и др.);

- осаждаемые из газовой фазы PVD и CVD (TiN , AlN , MoCrN , CrN , DLC и др.).

Наибольшее количество поршневых колец выпускается с хромовым покрытием толщиной 60–300 мкм. Следует отметить, что формирование хромового покрытия сопровождается насыщением поверхности водородом, способствующим водородному износу и снижению усталостной прочности поршневых колец.

Повышение износостойкости канавок поршней достигается за счет хромирования (чугунных поршней), использования специальных вставок, например залитых в алюминиевый поршень из чугуна с высоким содержанием никеля, закалкой ТВЧ, плазменной наплавкой и лазерной закалкой (чугунных поршней).

Корпорацией SilcoTek™ (США) разработано химически инертное кремниевое покрытие SilcoKlean™1000, применяемое для снижения закоксованности металлических поверхностей и образования различных отложений, ингибирующее каталитические реакции, защищающее от обрастания углеродистыми отложениями, антинагарное. Такое покрытие применяется для деталей двигателей и различной топливной аппаратуры в целях повышения их долговечности, тепловой эффективности, способности выдерживать повышенные температуры нагрева, снижения затрат на их техническое обслуживание [14]. Покрытие SilcoKlean™1000 не только предотвращает образование нагара, но и облегчает удаление других загрязнений (лака, шлама), которые образуются на нагретой поверхности. Например, удаление загрязнений с поверхности, имеющей покрытие SilcoKlean™1000, возможно с помощью ультразвуковой обработки в обычных растворителях, что значительно упрощает процедуру обслуживания и продления цикла эксплуатации деталей. Покрытие SilcoKlean™1000 состоит из гидрогенизированного аморфного кремния и имеет повышенные пластические свойства, по толщине (100–500 нм) укладывается в допуски на геометрические размеры деталей, выдерживает температуры до 1100 °С.

Выбор технологии и материала покрытия для упрочнения поршневых колец

Выбор материала покрытия и технологии его нанесения для упрочнения поршневых колец и канавок под них в поршне основывался на необходимости использования финишной операции (исключающей окончательную абразивную обработку), минимизации приработочного износа, формировании неметаллического покрытия, которое предотвращает образование углеродистых отложений, связанных с горением топлива, толщиной до 3 мкм с повышенной нанотвердостью и модулем упругости, близким к модулю упругости подложки, обеспечивающим значение коэффициента трения (для пары трения покрытие—чугун в условиях граничной смазки) не более 0,04.

В соответствии с этой концепцией и в целях уменьшения расхода топлива и масла, снижения выброса токсичных веществ с выхлопными газами, уменьшения шума, достижения максимально возможной мощности и долговечности двигателя и других технических средств предлагается использовать технологию финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением на поршневые кольца покрытия на основе соединений кремния SilcoPateks™ (a-Si:H-Si-O-C-N), близкого по своим характеристикам к покрытию SilcoKlean™1000. Покрытие SilcoPateks многослойное, с толщиной монослоев 5–50 нм и общим количеством порядка 200–250 слоев.

Технологический процесс ФПУ основан на разложении и осаждении паров жидких химических соединений, вводимых в плазму дугового разряда, с образованием атомарного и молекулярного потоков частиц в плазмоструйном реакторе при нагреве изделий, не превышающем 150 °С [15].

Для оценки характеристик поверхностей поршневых колец после ФПУ и нанесения покрытия SilcoPateks проведены исследования трибологических свойств цилиндрических образцов нормализованным методом при трении скольжения, а также при испытаниях на микроабразивный износ в соответствии с международным стандартом EN 1071-6:2007.

Исследование трибологических характеристик покрытия SilcoPateks

Для комплексных сравнительных испытаний на трение и износ исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов со следующими покрытиями:

- TiAlN и MoCrN, осажденными в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока толщиной порядка 3 мкм;
- Al₂O₃-Cr₂O₃, нанесенным детонационным напылением толщиной 300 мкм;
- многослойным нанопокрытием с аморфной структурой толщиной 1 мкм SilcoPateks, нанесенным с применением технологии финишного плазменного упрочнения (бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с использованием летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой).

Сравнительные испытания износостойкости образцов с исследуемыми покрытиями проводились на автоматизированной установке, которая создана на базе машины трения МИ-1М, предназначенной для определения трибологических показателей в условиях трения скольжения и граничной смазки нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480–97 при проведении испытаний цилиндрических образцов из металлических материалов и сплавов.

При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный цилиндрический индентор. Для установки образцов и индентора использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора относительно испытываемой поверхности образца на промежуточной сферической опоре для реализации линейного контакта.

В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор персонального компьютера. Для измерения момента

трения и нагрузки использовались тензодатчики. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытываемого образца.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели:

- время приработки t_0 , ч, определяемое как от начала испытания до момента выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- прирабочный износ h_0 , мкм, как величина сближения, определяемая в момент окончания приработки t_0 ;
- коэффициент трения в конце испытаний f ;
- f_0/f — отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к его значению в конце испытаний f ;
- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{h - h_0}{L - L_0},$$

где h — суммарный износ образца за время испытаний, мкм; L — путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм; $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 t_0 v$ — путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки, мкм.

Испытания образцов проводились при следующих условиях: скорость скольжения $v = 1$ м/с; нормальное усилие нагружения $N = 100 \pm 0,5$ (%), Н (соответствует давлению, рассчитанному по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта — пластический насыщенный; вид смазки — граничная; вид смазывания — окунанием; ведущий вид изнашивания — усталостное; смазочный материал — индустриальное масло И-20А; материал индентора — твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца — 8 ч; материал основы образца — сталь Р18.

Результаты испытаний исследуемых покрытий на модернизированной установке МИ-1М представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты трибологических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Трибологический параметр	Показатель	TiAlN	MoCrN	Al ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	SilcoPateks
Прирабатываемость	t_0 , ч	0,58	0,75	0,80	0,33
	h_0 , мкм	1,30	1,50	1,75	0,90
	f_0/f	1,42	1,46	1,23	4,75
Антифрикционность	f	0,32	0,25	0,40	0,04
Износостойкость	h , мкм	9,70	9,60	7,78	6,90
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,12	3,09	2,31	2,16
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,35	3,32	2,69	2,38

На рис. 1–4 приведены протоколы испытаний исследуемых покрытий с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

Сравнение результатов трибологических испытаний нормализованным методом показало, что минимальными значениями коэффициента трения, времени приработки и износа обладает покрытие SilcoPateks. Коэффициент трения покрытия SilcoPateks более чем в 6 раз меньше коэффициента трения покрытий TiAlN, MoCrN и Al₂O₃-Cr₂O₃. Кривая износа для образца с покрытием SilcoPateks стабильна во времени, и имеется тенденция к уменьшению скорости роста износа после окончания приработки и износа покрытия.

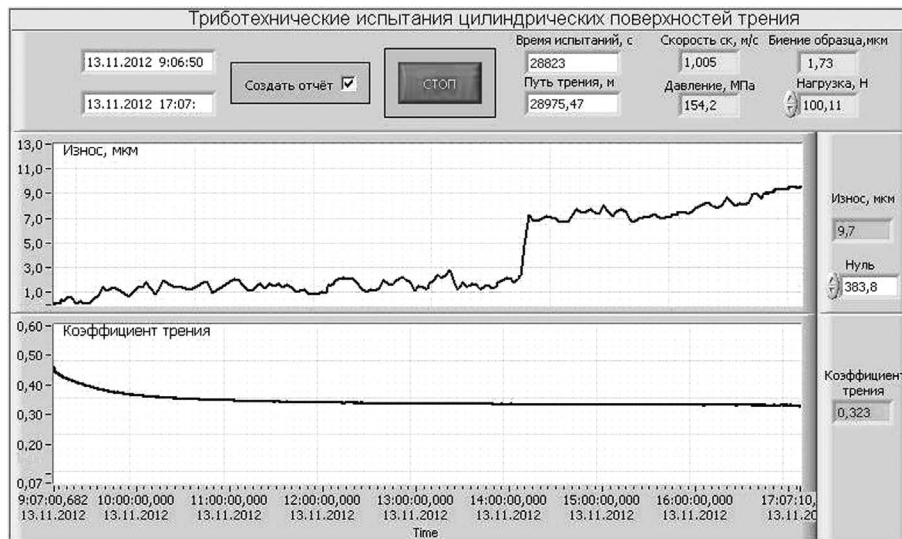


Рис. 1. Протокол испытаний покрытия TiAlN

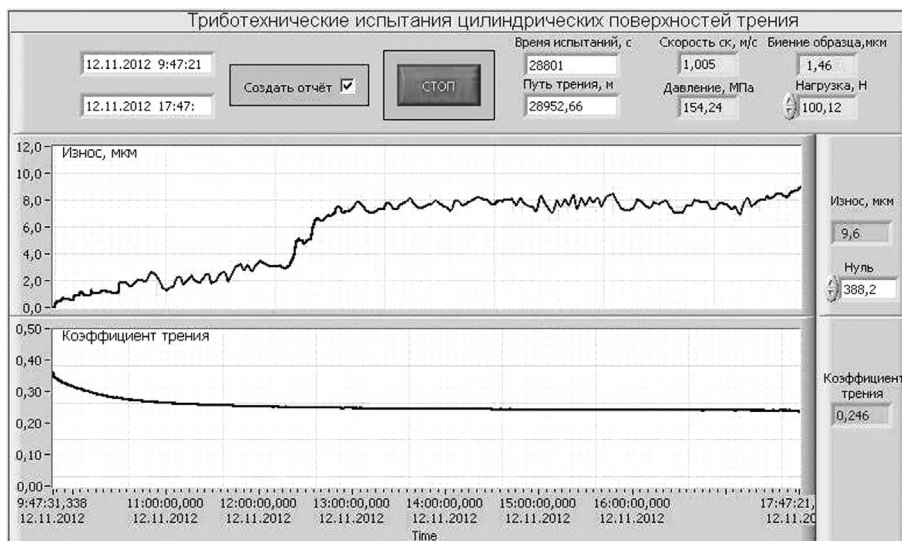


Рис. 2. Протокол испытаний покрытия MoCrN

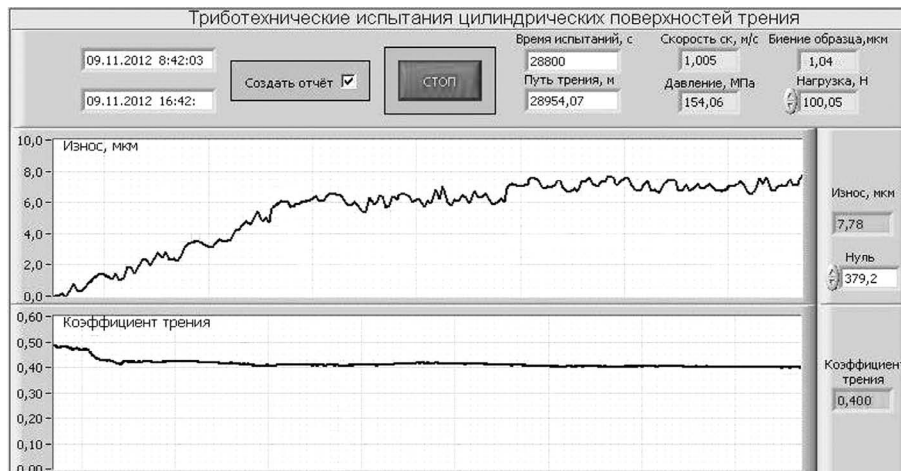


Рис. 3. Протокол испытаний покрытия $Al_2O_3-Cr_2O_3$

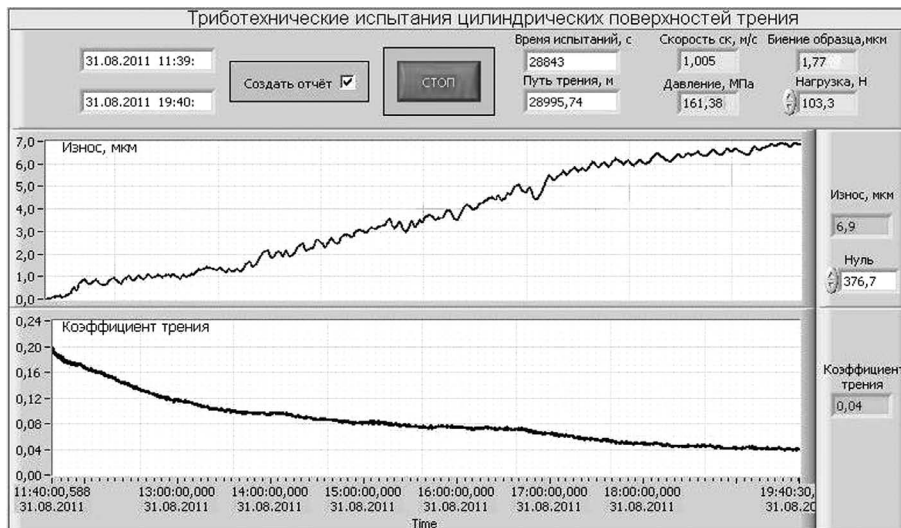


Рис. 4. Протокол испытаний покрытия SilcoPateks

Кривая износа покрытия SilcoPateks показывает, что длительность приработки составляет 0,33 ч, далее — 1,67 ч стабильный износ, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику. Сначала плавное снижение в течение 3 ч, а затем некоторая стабилизация с незначительным уменьшением, свидетельствующим о возможном «залечивании» дорожки трения микроскопическими продуктами износа.

На основании проведенных трибологических испытаний может быть сделан вывод о том, что более эффективным по параметрам трения и изнашивания является покрытие SilcoPateks.

Испытания на микроабразивное изнашивание покрытия SilcoPateks

Назначение испытаний на микроабразивное изнашивание связано с определением и сравнительным анализом параметров износа образцов, имеющих одинаковый химический состав и физико-механические свойства до и после нанесения покрытия. Микроабразивное изнашивание осуществляется при обеспечении точечного контакта двух сопряженных тел: свободно вращающегося стального шара и неподвижного плоского образца — при наличии в зоне трения абразивосодержащей суспензии. Испытания осуществляются в условиях наклонного расположения образца и прижатия к нему шара за счет собственной

массы. Наличие определенного количества абразивосодержащей суспензии в зоне трения шара с образцом обеспечивает быстрое получение отпечатка с износом. Нагрузка в зоне контактного трения является постоянной величиной при использовании одинаковых шаров (одних и тех же размеров, параметров шероховатости и материалов), угла наклона образца и точек опор шара на приводном валу. Условия износа образцов являются одинаковыми при постоянстве шаров, скорости вращения приводного вала, времени испытаний, использовании одной и той же абразивосодержащей суспензии и постоянного количества или скорости ее ввода.

Принцип микроабразивного изнашивания состоит в воздействии абразивных частиц микрометрического размера, содержащихся в абразивосодержащей суспензии, которые находятся в зазоре между двумя поверхностями в процессе трения. В условиях вращения шара относительно неподвижного плоского образца абразивные частицы удаляют с испытываемого образца выступы шероховатости на точечной поверхности, полируя и выглаживая ее, с образованием сферического сегмента износа [16].

Оборудование для определения параметров износа при испытаниях на микроабразивное изнашивание состоит из калотестера Tribotester PC101 с комплектом шаров, микроскопа, компьютера, эталонной меры малой длины, соединительных проводов и программного обеспечения (рис. 5). Калотестер предназначен для позиционирования шара и его вращения с заданной скоростью относительно строго установленного образца в течение заданного времени испытаний, а также для переустановки образца в целях его замены или получения нового отпечатка на заданной поверхности. Моноvideомикроскоп имеет трансфокатор высокого разрешения, держатель грубой и точной фокусировки, основание, предметный стол с микроподвижками. В целях передачи изображения объекта исследования на компьютер применяется цифровая окулярная USB-видеокамера. По USB-кабелю изображение передается с микроскопа на компьютер, где его можно рассматривать, проводить измерения, а также сохранять в виде графических файлов. На компьютере уста-

навливается программа визуализации микроскопического изображения и определения геометрических размеров отпечатков.

Для исследований использовались шары диаметром 30 мм из стали ШХ15 с твердостью 60–62 HRC и параметром шероховатости поверхности $R_a \leq 0,1$ мкм. Для такого шара и калотестера Tribotester PC101 нормальная нагрузка на образец составляет 0,25 Н. При испытаниях применялась абразивосодержащая суспензия на водной основе с монокристаллами синтетического алмаза диаметром 1 мкм. Во время испытаний подача суспензии в зону трения являлась строго дозированной и повторяемой в заданном временном интервале.

Для исследований использовались плоские образцы диаметром 15 мм и толщиной 5 мм с $R_a \leq 0,32$ мкм, как с покрытием, нанесенным на торцевую поверхность, так и без покрытия. Условия испытаний: круговая скорость вращения вала $n_{\text{вал}} = 100$ об/мин (при этом круговая скорость вращения шара составляет 67 об/мин); время испытаний $t_{\text{исп}} = 30$ с. При данных условиях длина пути скольжения шара S относительно плоскости образца составляет 3156 мм и определяется по формуле

$$S = t_{\text{исп}} n_{\text{шар}} \pi D_{\text{шар}},$$

где $t_{\text{исп}}$ — время испытаний, мин; $n_{\text{шар}}$ — круговая скорость шара, об/мин; $D_{\text{шар}}$ — диаметр шара, мм.

Основными измеряемыми параметрами при испытаниях являются геометрические размеры кратера износа: $b_{\text{пар}}$, $b_{\text{перп}}$, $a_{\text{пар}}$, $a_{\text{перп}}$ (рис. 6).



Рис. 5. Общий вид оборудования для испытаний на микроабразивное изнашивание

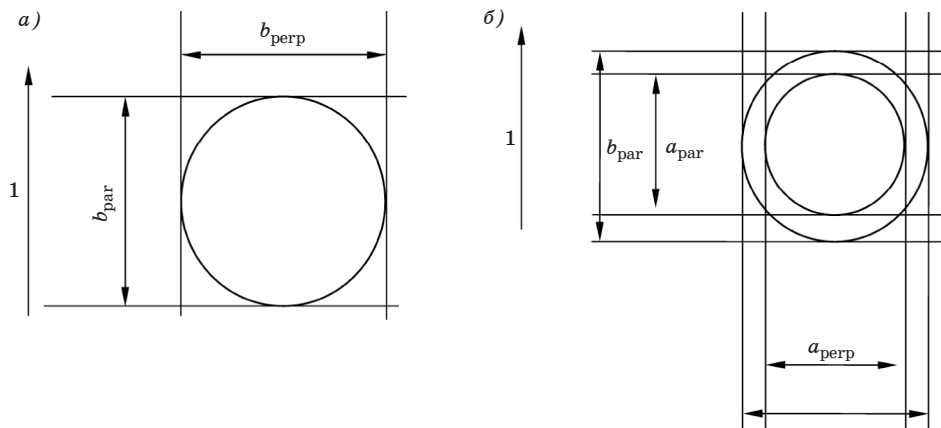


Рис. 6. Измеряемые параметры: *a* — для исходной подложки; *b* — для тонкопленочного покрытия; 1 — направление вращения шара

Основными расчетными параметрами при испытаниях на микроабразивное изнашивание являлись:

объемный износ подложки (для образцов без покрытия), мм³,

$$v_s = \pi \frac{b^4}{64R};$$

объемный износ покрытия (для образцов с тонкопленочным покрытием), мм³,

$$v_c = \frac{\pi}{64R} (b^4 - a^4);$$

объемный износ подложки (с учетом их совместного влияния), мм³,

$$v_s = \frac{\pi a^4}{64R};$$

сумма объемного износа покрытия и подложки, мм³,

$$V_c + V_s.$$

Вспомогательными расчетными параметрами являлись:

коэффициент износа подложки — отношение объемного износа подложки к длине пути скольжения и нормальной нагрузке, м³Н⁻¹м⁻¹ или мм³/(Н · мм),

$$K_s = \pi \frac{b^4}{64RSN};$$

коэффициент износа покрытия при глубине отпечатка больше толщины покрытия, м³Н⁻¹м⁻¹ или мм³/(Н · мм),

$$K_c = \frac{1}{\frac{SN}{V_c} - \frac{1}{K_s} \frac{V_s}{V_c}};$$

скорость изнашивания подложки — отношение объемного износа подложки ко времени, в течение которого возник износ, мм³/с,

$$W_s = V_s/t_{исп};$$

интенсивность изнашивания подложки — отношение объемного износа подложки к пути трения, на котором происходил износ, мм³/м,

$$I_s = V_s/S;$$

скорость изнашивания покрытия — отношение объемного износа покрытия ко времени, в течение которого возник износ, мм³/с,

$$W_c = V_c/t_{исп};$$

интенсивность изнашивания покрытия — отношение объемного износа покрытия к пути трения, на котором происходил износ, мм³/м,

$$I_c = V_c/S;$$

скорость изнашивания покрытия и подложки — отношение суммарного объемного износа покрытия и подложки ко времени, в течение которого возник износ, мм³/с,

$$W_{cs} = V_c + V_s/t_{исп};$$

Таблица 2.

Результаты измерений и расчетов испытания подложки

Номер отпечатка	Измерения		Расчет				
	$b_{\text{пар}}$, мкм	$b_{\text{перп}}$, мкм	b , мкм	$V_s \times 10^5$, мкм ³	$K_s \times 10^{-13}$, м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	$I_s \times 10^{-5}$, мм ³ /м	$W_s \times 10^5$, мкм ³ /с
1	931,52	931,52	936,57	25,17	15,95	39,87	0,42
2	905,96	905,96					
3	972,23	972,23					

интенсивность изнашивания покрытия и подложки — отношение суммарного объемного износа покрытия и подложки к пути трения, на котором происходил износ, мм³/м,

$$I_{cs} = V_c + V_s/S.$$

Сравнительный анализ полученных расчетов производился между объемным износом подложки без покрытия и суммарным объемным износом покрытия с подложкой. Объективность сравнительной оценки покрытий по параметрам, связанным с объемным износом, основана на постоянстве вида трения (скольжение), силовых и кинематических параметров (давления на поверхность трения, скорости скольжения), внешних условий (температуры, влажности, вибраций) и условий проведения испытаний (постоянства контртела, абразивного материала и его количества).

Используя методику, проводили испытания на микроабразивное изнашивание нанопокровтия SilcoPateks, наносимого с применением технологии ФПУ на материал под-

ложки из антифрикционного легированного чугуна АХНМД.

Результаты испытаний для подложки без покрытия приведены в табл. 2, а на рис. 7 показан один из исследуемых отпечатков подложки. Ниже приведены результаты измерений и расчетов этой подложки с покрытием SilcoPateks, а на рис. 8 — микрофотография отпечатка подложки с покрытием.

Результаты расчетов испытания покрытия SilcoPateks для средних диаметров отпечатков $a = 509$ мкм и $b = 778$ мкм

$V_s \times 10^5$, мкм ³	2,2
$V_c \times 10^5$, мкм ³	9,81
$(V_s + V_c) 10^5$, мкм ³	12,01
$K_c \times 10^{-13}$, м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	7,61
$I_c \times 10^{-5}$, мм ³ /м	15,54
$W_c \times 10^5$, мкм ³ /с	0,16
$K_s \times 10^{-3}$, м ³ Н ⁻¹ м ⁻¹	1,39
$I_s \times 10^{-5}$, мм ³ /м	3,49
$W_s \times 10^5$, мкм ³ /с	0,04
$I_{cs} \times 10^{-5}$, мм ³ /м	19,03
$W_{cs} \times 10^5$, мкм ³ /с	0,2

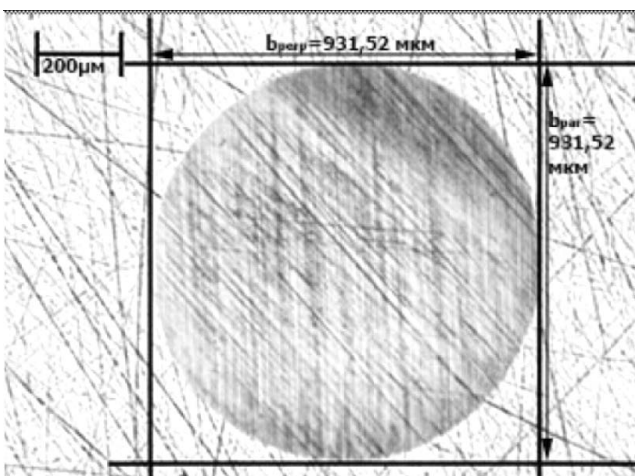


Рис. 7. Микрофотография отпечатка № 1 после испытаний на микроабразивное изнашивание материала подложки

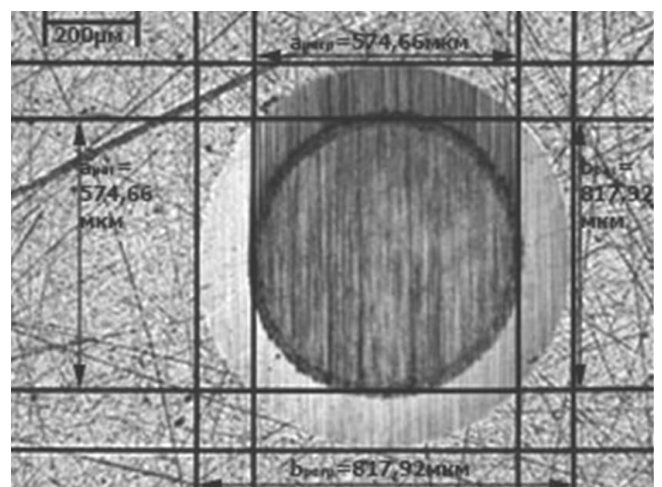


Рис. 8. Микрофотография одного из отпечатков покрытия SilcoPateks после испытаний на микроабразивное изнашивание

Ближайший аналог исследуемого покрытия SilcoPateks покрытие SilcoKlean™1000 корпорации SilcoTek (США) имеет коэффициент трения 0,7 и коэффициент износа $14 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$ [17]. Коэффициент трения покрытия SilcoPateks составляет 0,04, а коэффициент износа — $7,61 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$, что говорит о преимуществе покрытия SilcoPateks перед покрытием SilcoKlean™1000.

Результаты опытных испытаний поршневых колец с кремниевым покрытием, нанесенным методом ФПУ, показывают увеличение моторесурса двигателей, снижение расхода моторного масла и топлива, уменьшение длительности приработки и снижение шума двигателей [18–20]. Особенно эффективно использование данных покрытий для упрочнения поршневых колец и канавок под них в поршне для спортивных и гоночных автомобилей и мотоциклов.

Выводы

1. Разработана технология финишного плазменного упрочнения поршневых колец и канавок под них в поршне с нанесением неметаллического покрытия SilcoPateks на основе соединений кремния толщиной до 3 мкм, способствующего минимизации приработочного износа и обеспечивающего коэффициент трения не более 0,04.

2. Объемный износ, интенсивность, скорость изнашивания и, соответственно, коэффициент износа подложки из чугуна АХНМД после финишного плазменного упрочнения и нанесения нанопокрyтия SilcoPateks снизился практически в 2 раза.

3. Коэффициент износа нанопокрyтия SilcoPateks соответствует $7,61 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$ и практически в 2 раза меньше значения этого коэффициента его ближайшего аналога покрытия SilcoKlean™1000, наносимого CVD-технологией ($14 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$).

Литература

1. Энгелиш К. Поршневые кольца. Т. 1, 2. М.: Машгиз, 1962–1963. Т. 1. 583 с.; Т. 2. 368 с.
2. Устинов А. Н. Исследование поршневых колец дизелей. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. 128 с.
3. Гинцбург Б. Я. Теория поршневого кольца. М.: Машиностроение, 1979. 271 с.

4. Возницкий И. В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. СПб.: Моркнига, 2006. 116 с.

5. ISO 6621-1:2007. Internal combustion engines — piston rings.

6. Andersson P., Tamminen J., Sandström C.-E. Piston ring tribology. 2002. 105 p.

7. Multi-layer compound coating on cast iron piston ring by multi-arc and magnetron sputtering ion compound plating technique / S. Zhuo, Z. Peijun, Z. Leheng [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 131 N 1–3. P. 422–427.

8. Dynamic behaviours of piston rings and their practical impact. Pt 2: Oil transport, friction and wear of ring/liner interface and effects of piston and dynamics // Proc. Instn. Mech. Engrs. 2002. Vol. 216. Pt J. Engineering Tribology. P. 229–247.

9. Piston ring cylinder liner scuffing phenomenon studies using acoustic emission technique / M. Shuster, D. Combs, K. Kariip, D. Burke // Society of Automotive Engineers, Inc., 2000. 01-1782. 13 p.

10. A study on variation in oil film thickness of a piston ring package: variation of oil film thickness in piston sliding direction / T. Seki, K. Nakayama, T. Yamada [et al.] // JSAE Review. 2000. Vol. 21. N 3, P. 315–320.

11. Radil K. The influence of honing on the wear of ceramic coated piston rings and cylinder liners // Lubrication Engineering. 2000. Vol. 57. N 7. P. 10–14.

12. Schmitt E., Lange E. Pistons and engine testing. Stuttgart: MAHLE GmbH, 2012. 282 p.

13. Current and Future PVD systems and Coating Technologies / K. Takahara, K. Akari, H. Kawaguchi, H. Tamagaki // Kobelco technology review. 2005. N 26. P. 81–85. Режим доступа: http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_26/081-085.pdf

14. Altin O., Eser S. Carbon deposit formation from thermal stressing of petroleum fuels // Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. 2004, N 49 (2). P. 764–766.

15. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 406 с.

16. Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Испытания трибологических покрытий на микрообразное изнашивание. Механика и трибология транспортных систем: сбор. докл. международ. науч. конф., Ростов-на-Дону, 8–10 ноября 2016 г.: в 2 т. Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. Т. 2. С. 217–223.

17. https://www.silcotek.com/hubfs/docs/SilcoKlean_Data_Sheet.pdf?t=1510293994249

18. Тополянский А. П., Мьяконьков М. Б., Сабуров С. А. Исследование триботехнических свойств покрытий для поршневых колец, работающих в паре с чугунной втулкой. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня // Материалы 11-й Международ. науч.-практ. конф. 14–17 апр. 2009 г. Изд-во СПбГПУ, 2009. Ч. 2. С. 308–311.

19. Мьяконьков М. Б., Хмелевская В. Б. Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа // Металлообработка. 2010. № 3. С. 36–40.

20. Мьяконьков М. Б. Совершенствование технологии нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца судовых дизелей с учетом их вибрационного и напряженно-деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук. СПбГУВК, 2012. 135 с.