УДК 539.232

Казанцев И.А.,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»
Пензенский государственный университет
Россия, г. Пенза
Казанцев А.И.,
ведущий инженер
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие» «Рубин»
Россия, г. Пенза
Табачников А.А.,
магистрант
2 курс, факультет «Промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта»
Пензенский государственный университет
Россия, г. Пенза

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ОКСИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ НА ИХ СВОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Аннотация: *В статье рассматривается технология микродугового оксидироваяния поршней двигателей внутреннего сгорания, позволяющая изменить теплофизические свойства поршней из сплавов на основе алюминия. Установлено влияние теплофизических свойства поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания.*

Ключевые слова: *поршень, оксид, электролит, теплопроводность.*

Annotation: *In the article the technology of microarc oxidation of pistons of internal combustion engines is considered, allowing to change the thermophysical properties of pistons made of aluminum-based alloys. The effect of the thermophysical properties of pistons on the performance characteristics of internal combustion engines is established.*

Key words: *piston, oxide, electrolyte, thermal conductivity.*

Одним из основных направлений повышения тактико – технических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является снижение тепловых нагрузок на гильзо – поршневые группы. Особенно это принципиально для днища поршня. Высокие температуры приводят к возникновению таких дефектов, как оплавление и прогар поршня, которые происходят при значительном градиенте давлений в камере сгорания. Совместное влияние циклических и термических напряжений, инерционных сил, как правило, приводят к разрушению днища поршня, и как следствие, к остановке двигателя. При этом температура на поверхности днище поршня достигает 350 - 400 °С [1]. В форсированных ДВС температура может достигать 400 – 450 °С, что приводит к снижению прочностных характеристик алюминиевых поршней за счет частичного подплавления и окисления границ зерен. Поэтому температура на поверхности днища поршня из алюминиевого сплава не должна превышать 450 °С [2].

Перспективным направлением решения этой проблемы является нанесение на днище поршня теплоизоляционных слоев. Разработка новых технологий и формирование теплоизоляционных слоев на днище поршня, с целью улучшения технических характеристик современных ДВС, представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Известные способы получения покрытий с теплозащитными свойствами (установка на днище поршня многослойных пластин [3]; применение вставок;

напыление керамических покрытий из оксидов алюминия и циркония [4, 5]) требуемых адгезионных свойств, что приводит к их разрушению и отслоению в результате воздействия температурных и механических нагрузок. В этой связи большой интерес представляет технология микродугового оксидирования днищ поршней ДВС, обеспечивающая их тепловую защиту.

Микродуговое оксидирование – один из новых видов получения материалов с широким комплексом свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость, теплостойкость, электроизоляционные характеристики, декоративность, и уникальным их сочетанием [6].

Предварительные исследования, например покрытий на поршнях для двигателей внутреннего сгорания с нестабильной микроструктурой повысило их термостойкость в 2…2,5 раза (до 1600...1950 термоциклов) [7].

При МДО поршней ДВС из сплава АК12 были выбраны наиболее рациональные режимы (плотность тока j – 5А/дм^2; напряжение U–120 В; время – 5 мин) и состав электролита (силиката натрия ($nNa_2O \cdot mSiO_2$) – 80 г/л; фосфата натрия (Na_3PO_4) – 5 г/л и гидроксида натрия (NaOH) – 5 г/л).

Определение микротвердости теплозащитных слоев проводили по стандартной методике на поперечных микрошлифах по ГОСТ 9450-76 [8].

Образцы для исследований шлифовали для удаления рыхлого слоя покрытия, с последующей полировкой. Для измерений применяли наконечник, в виде четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136°20', нагрузка - 1,96 Н. Погрешность измерений - не более 0,3 мкм.

Пористость теплозащитных слоев оценивали по ГОСТ 9.302-88 [9].

Измерение коэффициента температуропроводности и теплопроводности определяли методом лазерной вспышки LFA 427.

При подготовке к измерению поверхности образца очищаются спиртом и покрываются коллоидным графитом (согласно инструкции по эксплуатации прибора и для лучшего поглощения теплового импульса), после чего

помещается в держатель прибора. Измерение проводится в атмосфере инертного газа – аргона.

Коэффициент температуропроводности α определяли по формуле:

$$\alpha = 0{,}1388 \cdot \frac{l^2}{t_{0.5}}, \tag{1}$$

где l – толщина пробы, $t_{0.5}$ - время достижения 50% значения от максимальной температуры.

Измерение удельной теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC823e. Согласно методике измерения на данном приборе масса образца должна быть сравнима с массой эталона, в качестве которого используется сапфировый диск.

Подготовка измерения начинается с изготовления навески из массивного образца. Форма и размеры навески определяются двумя факторами:

- объем тигля, в котором находится навеска при измерении, составляет 40 микролитров;

- навеска должна иметь максимально возможную площадь контакта с дном тигля.

Расчета значений удельной теплоемкости Ср из экспериментального сигнала основан на следующем соотношении:

$$C_p = \frac{DSC_{S+pan} - DSC_{zeroline}}{DSC_{St+pan} - DSC_{zeroline}} \frac{m_{St}}{m_S} C_{p,St} \tag{2}$$

где DSC_{S+pan}, DSC_{St+pan} – экспериментальный сигнал от образца (S) и тигля (pan), в который образец помещен, и стандарта (St) и тигля соответственно, $DSC_{zeroline}$ – экспериментальный сигнал от пустого тигля (нулевая линия или бланковый сигнал), m_S, m_{St} – масса образца (навески) и эталона, $C_{p,S}$, $C_{p,St}$ – удельная теплоемкость образца (навески) и эталона.

Расчет теплопроводности осуществляется согласно выражению:

$$\lambda(\mathrm{T}) = a(\mathrm{T}) \cdot \rho(\mathrm{T}) \cdot c_P(\mathrm{T}), \quad (3)$$

где α(T), ρ(T) и C_p(T) – температуропроводность, плотность и удельная теплоемкость образца при данной температуре.

Объекты испытаний представляли собой образцы материалов на основе алюминиевого сплава АК12 с оксидным покрытием и без него. Размер образцов 10 × 10 мм, толщина 5 мм. Плотность образцов составляла – 2720 кг/м^3.

Структуру теплозащитных оксидных слоев исследовали методом растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа [10].

Стендовые испытания бензинового двигателя УМЗ-417 со штатными поршнями (без теплозащитных оксидных слоев) и поршнями с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней проводились по ГОСТ 14846-81 [11] на стенде КИ-5543 ГОСНИТИ [12, 13].

Расчет эксплуатационных характеристик ДВС, оснащенного штатными поршнями, и поршнями с теплозащитными оксидными слоями проводили по методике [12]:

Крутящий момент двигателя M_K, определялся по формуле:

$$M_K = P_{ПИУ} l., \text{ Н·м}, \quad (4)$$

где $P_{ПИУ}$ – показания измерительного устройства тормоза стенда, Н;

l – плечо весового устройства тормоза стенда, 0,7162 м.

Эффективную мощность N_e, двигателя определяли по формуле:

$$N_e = \frac{M_K \cdot n \cdot 1{,}36}{716{,}2}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин$^{-1}$.

Расход топлива (G_T кг/ч) исследуемого двигателя определяли весовым способом с последующим расчетом по формуле:

$$G_T = \frac{3{,}6\,\Delta G}{\tau}, \quad (6)$$

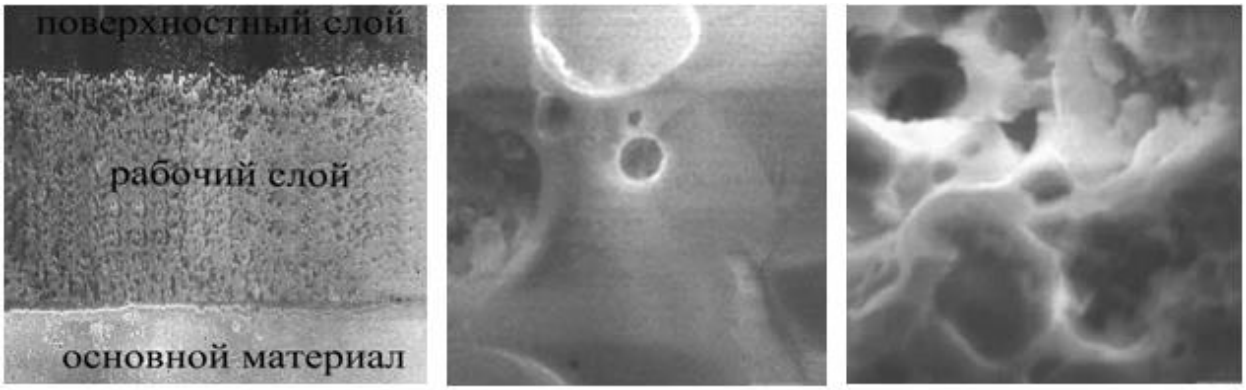
где ΔG – количество топлива, израсходованное за время проведения измерения, г; τ – время проведения измерения расхода топлива, с.

Удельный расход топлива (g_e, г/кВт·ч) исследуемых двигателей определяли по формуле:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3, \tag{7}$$

где N_e – мощность двигателя, установленная при исследованиях, кВт.

В результате анализа макро - и микрошлифа установлено, что толщина теплозащитных оксидных слоев составила 25 мкм (рис. 1) – 4…5 мкм поверхностного слоя и 20…25 мкм рабочего [6, 7].



×200 ×4000 ×4000

1 – макроструктура; 2 – пористость рабочего слоя; 3 – пористость поверхностного слоя

Рисунок 1. Структура и пористость теплозащитных оксидных слоев днища поршня

Микротвердость штатного поршня составила 540 МПа, а оксидированного- 1200 МПа, что в 2,2 раза выше, чем у штатного.

Результаты исследования теплопроводности материалов днища поршня, обработанных микродуговым оксидированием (покрытие с одной стороны), при различных температурах испытания показали существенное влияние на коэффициент теплопроводности λ наличие оксидных слоев. Установлено, что после микродугового оксидирования днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25 – 26 % и составил в среднем λ ~ 97,30

Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности λ ~ 122 - 126 Вт/(м·К)).

В результате исследования теплозащитных оксидных слоев установлено, что структура и пористость неоднородны по толщине. Пористость по толщине также неоднородна, сквозные каналы пор отсутствуют, что позволяет обеспечивать высокие теплоизоляционные свойства днища поршня. Поры и отслоения на границе покрытие – материал поршня отсутствуют.

Анализ микрофотографий позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой.

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов скоростных характеристик показывает, что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, эффективная мощность растет с увеличением скорости. Так, при частоте вращения коленчатого вала 4100 мин$^{-1}$ эффективная мощность у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 3 кВт больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет $N_e = 62{,}6$ кВт.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала 2400 - 2500 мин$^{-1}$ максимальный крутящий момент у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 10 $Н \cdot м$ больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет 175 – 180 $Н \cdot м$.

При оборотах 2400 - 2500 мин$^{-1}$ удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней, снизился, в среднем, на 7,7 % и составил 258,7 – 259, 9 г/кВт·ч.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала 4100 мин$^{-1}$часовой расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней, снизился на 4,6 % и составил 19 кг/ч.

При частоте вращения 2400 – 2500 мин$^{-1}$ фиксировали нагрузочные характеристики двигателя. Указанная частота вращения коленчатого вала

является номинальной и соответствует максимальному крутящему моменту двигателя.

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов нагрузочных характеристик показывает, что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, часовой расход топлива на 1,1% меньше и составил 3,79 кг/ч.

Удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 16% меньше, чем у двигателей со штатными поршнями, и составляет 619,77 $г/кВт \cdot ч$.

У двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней снизилось содержание оксида углерода (CO) и углеводорода (CH) в отработанных газах, в среднем, на 7 %, и 10 % соответственно, по сравнению с двигателем со штатными поршнями.

Результаты стендовых испытаний согласуется с данными работы [14].

Установлено, что после микродугового оксидирования днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25 – 26 % и составил в среднем λ ~ 97,30 Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности λ ~ 122 - 126 Вт/(м·К)).

Анализ микрофотографий позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой.

По результатам стендовых испытаний установлено, что у двигателей с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней повышаются максимальный крутящий момент и эффективная мощность, снижается часовой и удельный эффективный расход топлива (часовой на 4,6 %, удельный на 7,7 %), уменьшается содержание в отработанных газах оксида углерода на 7 %, углеводорода на 10%.

Используемые источники:

1. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И., Круглов М.Г., Леонов О.Б., Меднов А.А., Мизернюк Г.Н., Орлин А.С., Роганов С.Г. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для втузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
2. Бугаев В.П. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей. М.: Колос, 1981. 209 с.
3. Сергеев А.В., Казаков Н.Ф., Смирнова Т.Н., Болдырев И.В. Способ тепловой защиты днища поршня: пат. 585034 СССР. 1977. Бюл. № 47. 2 с.
4. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А., Кадыров С.М., Арипджанов М.М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 4. С. 83-102.
5. Сибриков Д.А. Снижение теплонапряженности поршневых групп судовых дизелей: автореф. дис. . канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 18 с.
6. Казанцев И.А., Кривенков А.О. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография [Текст] / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков- Инф.изд.центрПензГУ, 2007.-239с.
7. КазанцевИ.А., СкачковВ.С., Данилин А.М. // Теплофизические характеристики поршней ДВС с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности // VIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков»: Сб. статей. – Пенза. – 2003. – ч. 1 С. - 264-266.
8. ГОСТ 9450 – 76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (СТ СЭВ 1195 - 78).

9. ГОСТ 9.302 – 88 Покрытия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля).

10. Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах. Книга 2. Пер. с анг./ Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 384с.

11. ГОСТ 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний.

12. Шкилько, А.М. Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования / Шкилько А.М. – К.: ИСИО, 1994. – 170 с.

13. Шкилько, А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография [Текст] / А.М. Шкилько. – Харьков: Ноулидж, 2009. – 240 с.

14. Патент на изобретение 2439211 Россия, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана, и их сплавов / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, А.Л. Хохлов, В.А. Степанов, К.У. Сафаров. – № 2010140537/02; Заяв.04.10.2010; Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.