

И. А. Казанцев, В. И. Бычков, А. И. Казанцев

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРШНЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются поршни двигателей внутреннего сгорания. Предметом исследования является процесс получения защитных покрытий на поршнях микродуговым оксидированием. Цель работы – установление влияния теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Материалы и методы. При проведении исследований и разработке технологии микродугового оксидирования поршней применяли сплав на основе алюминия (АК12) и электролит на основе натриевого жидкого стекла, гидроксида и фосфата натрия. Определение микротвердости теплозащитных слоев проводили по стандартной методике на поперечных микрошлифах по ГОСТ 9450–76. Пористость теплозащитных слоев оценивали по ГОСТ 9.302–88. Измерение коэффициента температуропроводности и теплопроводности определяли методом лазерной вспышки LFA 427. 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 на стенде КИ-5543 ГОСНИТИ.

Результаты. Установлено влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания. Показано, что снижение теплопроводности днища поршня позволяет улучшить технические характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Выводы. По результатам стендовых испытаний установлено, что у двигателей с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней повышаются максимальный крутящий момент и эффективная мощность, снижается часовая и удельный эффективный расход топлива, уменьшается содержание в отработанных газах оксида углерода и углеводорода.

Ключевые слова: поршень, оксид, электролит, теплопроводность.

I. A. Kazantsev, V. I. Bychkov, A. I. Kazantsev

IMPACT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF PISTON ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Abstract.

Background. The object of the study are pistons of internal combustion engines. The subject of the research is the process of obtaining protective coatings on pistons by microarray oxidation. The aim of the work is to establish the influence of thermal properties of pistons on the performance of internal combustion engines.

Materials and methods. Aluminum-based alloy (AC12) and electrolyte based on sodium liquid glass, sodium hydroxide and sodium phosphate were used in the research and development of the technology of micro-arc oxidation of pistons. Determination of microhardness of heat-shielding layers was carried out according to the standard technique on cross-section microshoots according to GOST 9450-76. The porosity of the heat-shielding layers was evaluated according to GOST 9.302-88. Temperature conductivity and thermal conductivity were measured by laser flash method LFA 427. Bench tests of the petrol engine UMZ-417 with standard pistons (without thermal protection oxide layers) and pistons with thermal protection oxide layers on the bottoms of pistons were carried out according to GOST 14846-81 on the stand KI-5543 GOSNITI.

Results. The influence of thermal properties of pistons on the performance of internal combustion engines is established. It is shown that reducing the thermal conductivity of the piston bottom allows to improve the technical characteristics of internal combustion engines.

Summary. By results of bench tests it is established that at engines with heat-proof oxide layers on bottoms of pistons the maximum torque and effective power increase, the hour and specific effective fuel consumption decreases, the content in the fulfilled gases of carbon monoxide and hydrocarbons decreases.

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

Введение

Одним из основных направлений повышения 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, приводит к разрушению днища поршня и, как следствие, к остановке двигателя. При этом температура на поверхности днища 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.

Известны 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 (МДО) днищ поршней ДВС, обеспечивающая их тепловую защиту.

МДО – один из новых видов получения материалов с широким комплексом свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость, тепло-

стойкость, электроизоляционные характеристики, декоративность, и уникальным их сочетанием [6].

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

1. Материалы и методики

При МДО поршней ДВС из сплава АК12 были выбраны наиболее рациональные режимы (плотность тока $j - 5 \text{ А/дм}^2$; напряжение $U - 120 \text{ В}$; время – 5 мин) и состав электролита (силиката натрия ($n\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$) – 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 $136^\circ 20'$, 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 помещаются в держатель прибора. Измерение проводится в атмосфере инертного газа – аргона.

Коэффициент температуропроводности α определяли по формуле

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{l^2}{t_{0,5}}, \quad (1)$$

где l – толщина пробы; $t_{0,5}$ – время достижения 50 % значения от максимальной температуры.

Измерение удельной теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC823е. 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.

Расчет значений удельной теплоемкости C_p из экспериментального сигнала основан на следующем соотношении:

$$C_p = \frac{DSC_{St+pan} - DSC_{zeroline}}{DSC_{St+pan} - DSC_{zeroline}} \frac{m_{St}}{m_S} C_{p,St}, \quad (2)$$

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 осуществлялся согласно выражению

$$\lambda(T) = \alpha(T) \cdot \rho(T) \cdot c_p(T), \quad (3)$$

где $\alpha(T)$, $\rho(T)$ 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

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

где $P_{\text{ПИУ}}$ – 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

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3, \quad (7)$$

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

2. Результаты исследования и их обсуждение

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].

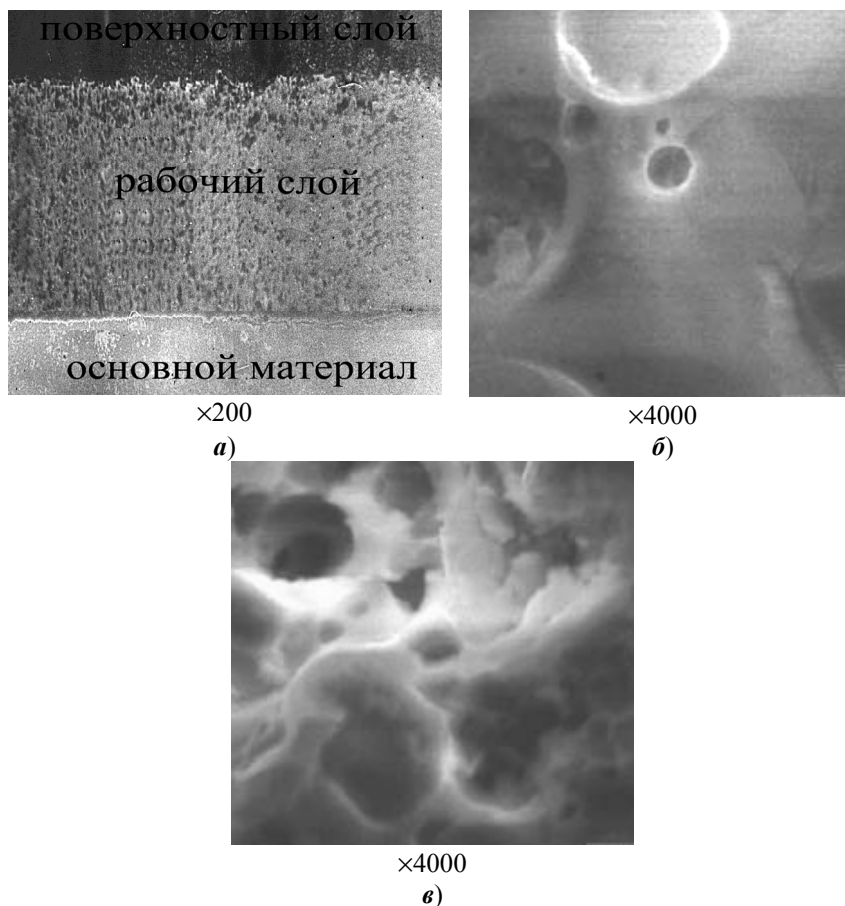


Рис. 1. Структура и пористость теплозащитных оксидных слоев днища поршня:

а – макроструктура; *б* – пористость рабочего слоя;
в – пористость поверхностного слоя

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

Теплофизические характеристики материала штатного поршня и поршня с теплозащитными оксидными слоями представлены в табл. 1.

Результаты исследования теплопроводности материалов днища поршня, обработанных МДО (покрытие с одной стороны), при различных температурах испытания показали существенное влияние на коэффициент теплопроводности λ наличие оксидных слоев. Установлено, что после МДО днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25–26 % и составил в среднем $\lambda \sim 97,30$ Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 122$ –126 Вт/(м·К).

Характеристики теплопроводности

Объект испытаний	Температура испытаний, °С	Наименование параметра		
		Теплоемкость, Дж/кг·К	Температуропроводность, мм ² /с	Теплопроводность, Вт/м·К
AK12 без теплозащитных оксидных слоев	130	0,87	52,33	123,73
	150	0,86	52,20	122,46
	170	0,88	51,93	124,26
	190	0,88	51,72	123,82
	210	0,89	51,60	124,92
	230	0,91	51,19	126,40
AK12 с теплозащитными оксидными слоями	130	0,87	42,33	100,54
	150	0,86	42,15	98,96
	170	0,86	41,89	98,06
	190	0,84	41,67	95,56
	210	0,84	41,45	95,05
	230	0,87	41,12	97,30

В результате исследования теплозащитных оксидных слоев установлено, что структура и пористость неоднородны по толщине. Пористость по толщине также неоднородна (рис. 2), сквозные каналы пор отсутствуют, что позволяет обеспечивать высокие теплоизоляционные свойства днища поршня.

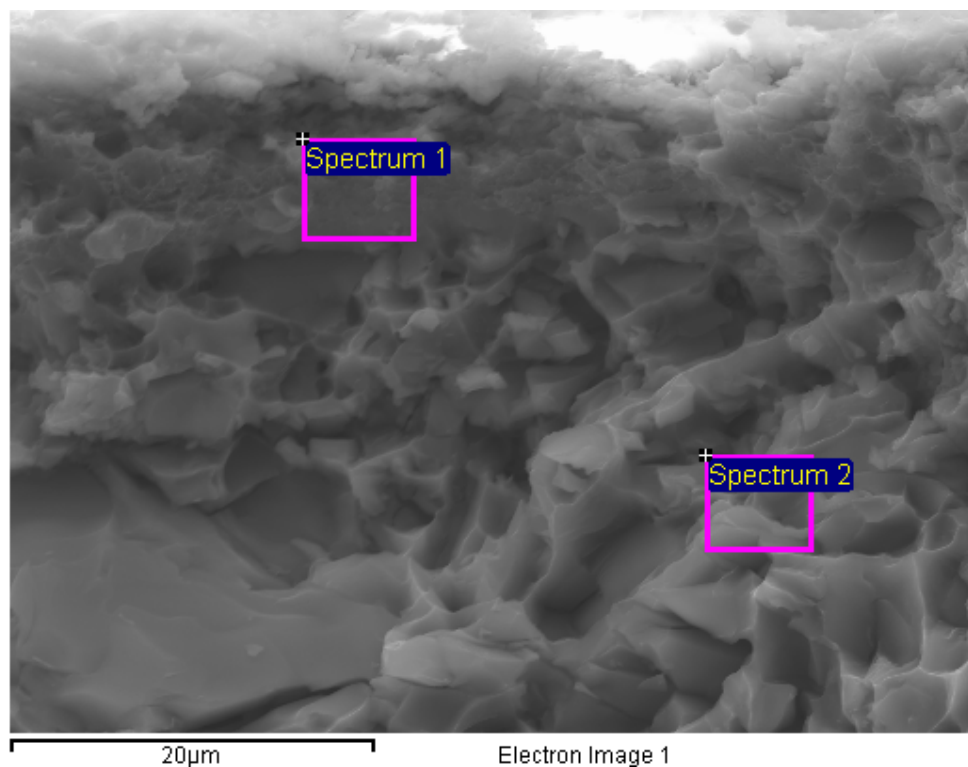


Рис. 2. Поверхность излома образца с теплозащитными оксидными слоями на днище поршня

Выделенные области на микрофотографиях подтверждают неоднородность оксидных слоев. Поры и отслоения на границе «покрытие – материал поршня» отсутствуют.

Анализ микрофотографий (рис. 3, 4) позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой (рис. 3) имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой (рис. 4).

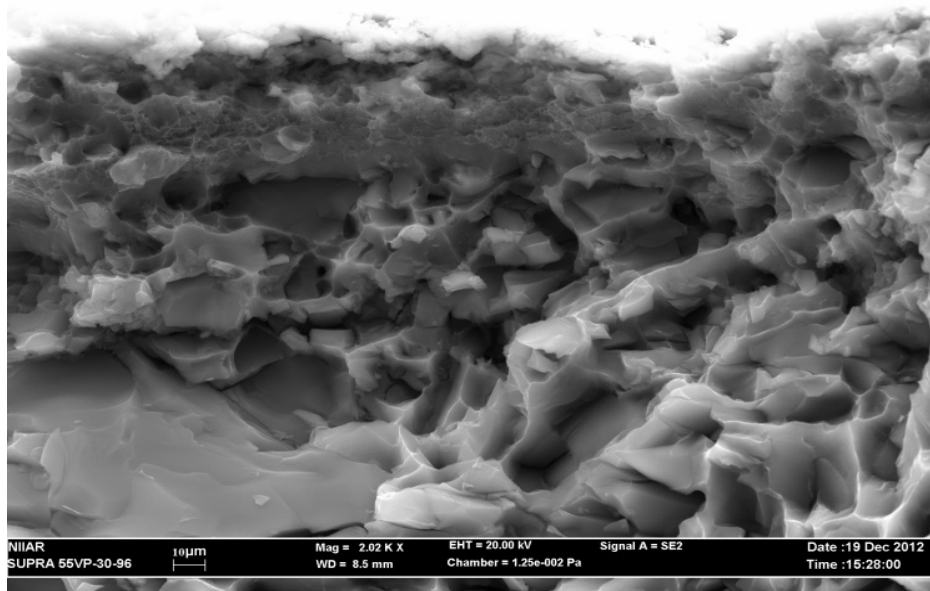


Рис. 3. Поверхность излома поверхностного оксидного слоя

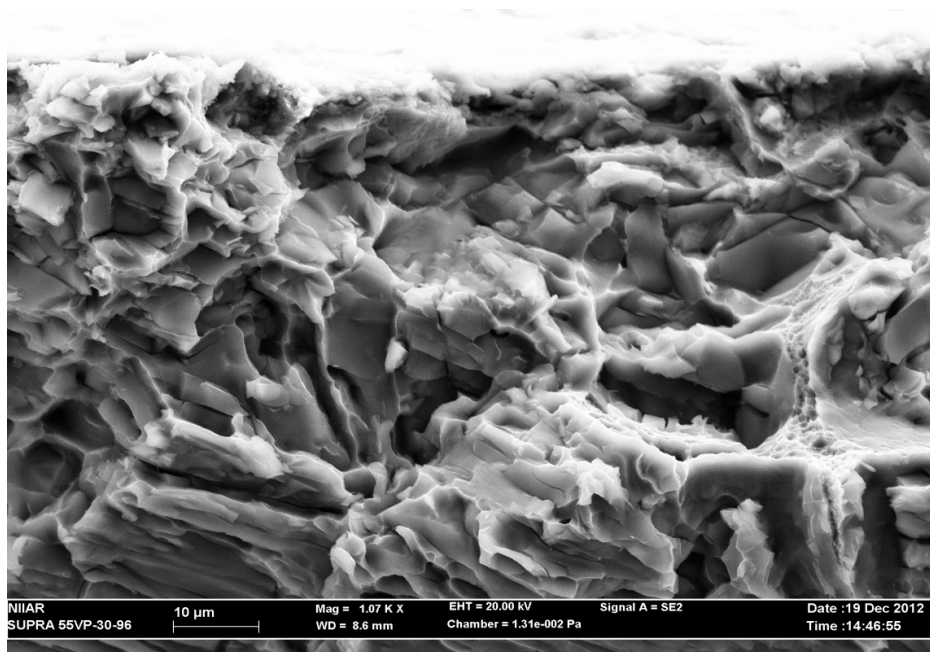


Рис. 4. Поверхности излома рабочего оксидного слоя

Результаты стендовых испытаний представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Внешняя скоростная характеристики двигателя

Объект испытаний	Наименование параметра			
	Эффективная мощность (N_e), кВт	Максимальный крутящий момент (M_k), Н·м	Удельный эффективный расход топлива (g_e), г/кВт·ч	Часовой расход топлива (G_T), кг/ч
Двигатели, оснащенные поршнями без теплозащитных оксидных слоев	59,6	175–180	280,3–281,3	19,9
Двигатели, оснащенные поршнями с теплозащитными оксидными слоями	62,6	165–170	258,7 – 259,9	19,1

Таблица 3

Нагрузочная характеристики двигателя

Объект испытаний	Наименование параметра			
	Удельный эффективный расход топлива (g_e), г/кВт·ч	Часовой расход топлива (G_T), кг/ч	Содержание оксида углерода (CO), %	Содержание углеводорода (CH), %
Двигатели, оснащенные поршнями без теплозащитных оксидных слоев	736,90	3,83	0,75	30
Двигатели, оснащенные поршнями с теплозащитными оксидными слоями	619,77	3,79	0,70	27

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов скоростных характеристик показывает (табл. 2), 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 $N_e = 62,6 \text{ кВт}$.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала $2400\text{--}2500 \text{ мин}^{-1}$ максимальный крутящий момент у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 10 Н·м больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет 175–180 Н·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 (табл. 3). 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 (при минимальной мощности 6,17 кВт). При этом 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·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 согласуются с данными работы [14].

Результаты исследований позволяют сделать вывод об эффективной защите поршней ДВС, оснащенных теплозащитными оксидными слоями, от воздействия высокотемпературных тепловых потоков, выходящих из камер внутреннего сгорания, что позволяет увеличить эффективную мощность и максимальный крутящий момент, снизить удельный и часовой расход топлива. Повышение температуры сгорания топлива, в свою очередь, снижает токсичность отработанных газов.

Заключение

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

Выводы

Установлено влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания. Показано, что

снижение теплопроводности днища поршня позволяет улучшить технические характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов 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 / В. П. Бугаев. – М. : Колос, 1981. – 209 с.
3. Пат. 585034 СССР. Способ тепловой защиты днища поршня / Сергеев А. В., Казаков Н. Ф., Смирнова Т. Н., Болдырев И. В. – 1977, Бюл. № 47. – 2 с.
4. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, А. А. Зеленцов, С. М. Кадыров, М. М. Арипджанов // Вестник Московского государственного технического университета 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 / Сибриков Д. А. – Новосибирск, 2004. 18 с.
6. **Казанцев, И. А.** Технология получения композиционных материалов микродуговым окислением : монография / И. А. Казанцев, А. О. Кривенков. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2007. – 239с.
7. **Казанцев, И. А.** Теплофизические характеристики поршней ДВС с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности / И. А. Казанцев, В. С. Скачков, А. М. Данилин // Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2003. – Ч. 1. – С. 264–266.
8. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (СТ СЭВ 1195–78). – М., 1976.
9. ГОСТ 9.302–88. Покрытия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля). – М., 1988.
10. Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ : пер. с англ. : в 2 кн. Кн. 2 / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. – М. : Мир, 1984. – 384с.
11. ГОСТ 14846–81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М., 1981.
12. **Шкилько, А. М.** Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования / А. М. Шкилько. – К. : ИСИО, 1994. – 170 с.
13. **Шкилько, А. М.** Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов : монография / А. М. Шкилько. – Харьков : Ноулидж, 2009. – 240 с.
14. Пат. 2439211 Российской Федерации, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана, и их сплавов / Казанцев И. А., Кривенков А. О., Чугунов С. Н., Хохлов А. Л., Степанов В. А., Сафаров К. У. – № 2010140537/02 ; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

References

1. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley: uchebnik dlya vtuzov po spetsial'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya»* [Engines of internal combustion: Theory of piston and combined engines: a textbook for

- technical universities in the specialty "Internal combustion engines"]. Eds. A. S. Orlin, M. G. Kruglov. 4th ed., rev. and updated. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 372 p.
2. Bugaev V. P. *Ekspluatatsiya i remont forsirovannykh traktornykh dvigateley* [Operation and repair of forced tractor engines]. Moscow: Kolos, 1981, 209 p.
 3. *Pat. 585034 SSSR. Sposob teplovo y zashchity dnishcha porshnya* [Patent 585034 USSR. The method of thermal protection of the piston bottom]. Sergeev A. V., Kazakov N. F., Smirnova T. N., Boldyrev I. V. 1977, Bul. № 47, 2 p.
 4. Kavtaradze R. Z., Onishchenko D. O., Zelentsov A. A., Kadyrov S. M., Aripdzhanov M. M. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Machine building]. 2011, no. 4, pp. 83–102.
 5. Sibrikov D. A. *Snizhenie teplonapryazhennosti porshnevykh grupp sudovykh dizeley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Reducing the thermal stress of the piston groups of ship diesel engines: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Novosibirsk, 2004, 18 p.
 6. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O. *Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh materialov mikrodugovym oksidirovaniem: monografiya* [Technology for producing composite materials by microarc oxidation: monograph]. Penza: Inf. izd. tsentr PenzGU, 2007, 239 p.
 7. Kazantsev I. A., Skachkov V. S., Danilin A. M. *Problemy mashinostroeniya i tekhnologii materialov na rubezhe vekov: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of machine building and materials technology at the turn of the century: proceedings of VIII International scientific and practical conference]. Penza, 2003, part 1, pp. 264–266.
 8. *GOST 9450–76. Izmerenie mikrotverdosti vdvavlivanemalmaznykh nakonechnikov (ST SEV 1195–78)* [State standart 9450-76. Measurement of microhardness by indentation of diamond tips (ST CAME 1195-78)]. Moscow, 1976.
 9. *GOST 9.302–88. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie (metody kontrolya)* [State standart 9.302-88. Metallic and non-metallic inorganic coatings (control methods)]. Moscow, 1988.
 10. Gouldsteyn Dzh., N'yuberi D., Echlin P. i dr. *Rastrovaya i elektronnyaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz: per. s ang.: v 2-kh knigakh. Kn. 2.* [Raster and electron microscopy and X-ray microanalysis: translated from English: in 2 books. Book 2]. Moscow: Mir, 1984, 384 p.
 11. *GOST 14846–81 Dvigateli avtomobil'nye. Metody stendovykh ispytaniy* [Automotive engines. Methods of benchmark test]. Moscow, 1981.
 12. Shkil'ko A. M. *Nerazrushayushchie metody kontrolya metallov i uzlov energeticheskogo oborudovaniya* [Non-destructive testing methods for metals and energy equipment components]. Kiev: ISIO, 1994, 170 p.
 13. Shkil'ko A. M. *Ekzoeffmissionnaya diagnostika poverkhnosti konstruksionnykh materialov: monografiya* [Examination diagnostics of the surface of structural materials: monograph]. Kharkov: Noulidzh, 2009, 240 p.
 14. *Pat. 2439211 Rossiyskoy Federatsii, MPK F02F 3/12. Sposob obrabotki porshney dvigateley vnutrennego sgoraniya iz alyuminiya, titana, i ikh splavov* [Patent 2439211 of the Russian Federation, MPK F02F 3/12. The method of processing the pistons of internal combustion engines of aluminum, titanium, and their alloys]. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O., Chugunov S. N., Khokhlov A. L., Stepanov V. A., Safarov K. U. № 2010140537/02; appl. 04.10.2010; publ. 10.01.2012, Bul. № 1.

Казанцев Игорь Алексеевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kazancev678@mail.ru

Kazantsev Igor' Alekseevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of welding,
foundry and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Бычков Валерий Игоревич

магистрант, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pnz.el@mail.ru

Bychkov Valeriy Igorevich

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Казанцев Алексей Игоревич

инженер-механик I категории, Научно-
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, Байдукова, 2)

E-mail: ale.kaza@yandex.ru

Kazantsev Aleksey Igorevich

Engineer-mechanic of 1st category,
Scientific production enterprise "Rubin"
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 539.232

Казанцев, И. А.

Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания / И. А. Казанцев, В. И. Бычков, А. И. Казанцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 107–118. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-10.