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

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ОКСИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ И ИХ СВОЙСТВА

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

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.*

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

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, 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:

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

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:

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

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:

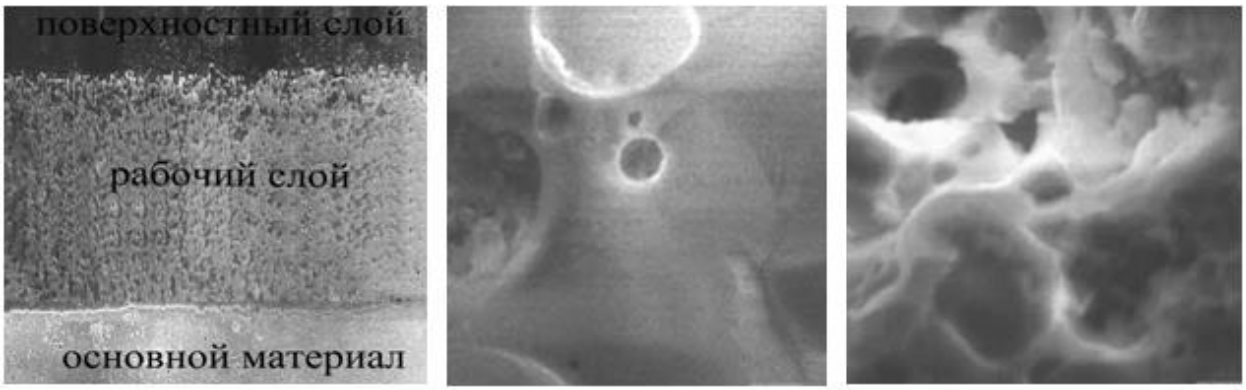
$$\lambda(\mathrm{T}) = a(\mathrm{T}) \cdot \rho(\mathrm{T}) \cdot c_P(\mathrm{T}), \qquad (3)$$

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].

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.

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

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)).

Таблица 1.

Характеристики теплопроводности

Объект испытаний	**Температура испытаний, °С**	**Наименование параметра**		
		Теплоемкость, Дж/кг∗К	**Температуро-проводность, мм²/с**	**Теплопро-водность, Вт/м∗К**
АК12 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
АК12 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. Поры и отслоения на границе покрытие – материал поршня отсутствуют.

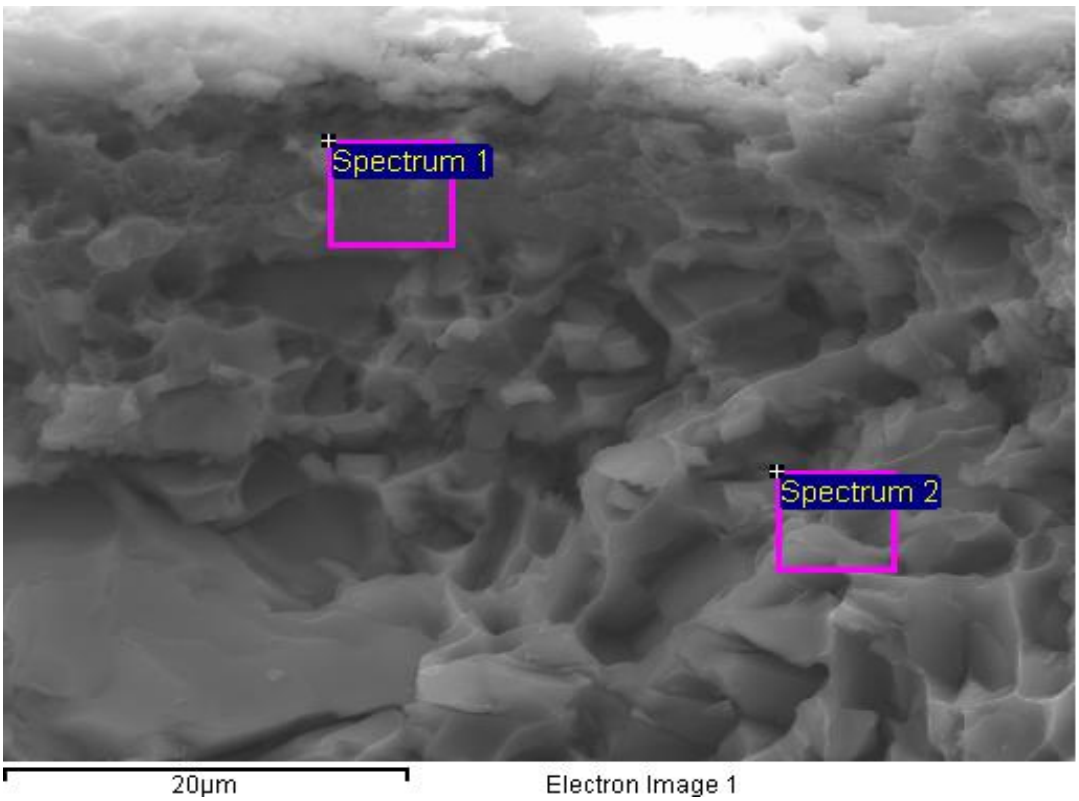


Рисунок 2. Поверхность излома образца с теплозащитными оксидными слоями на днище поршня

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

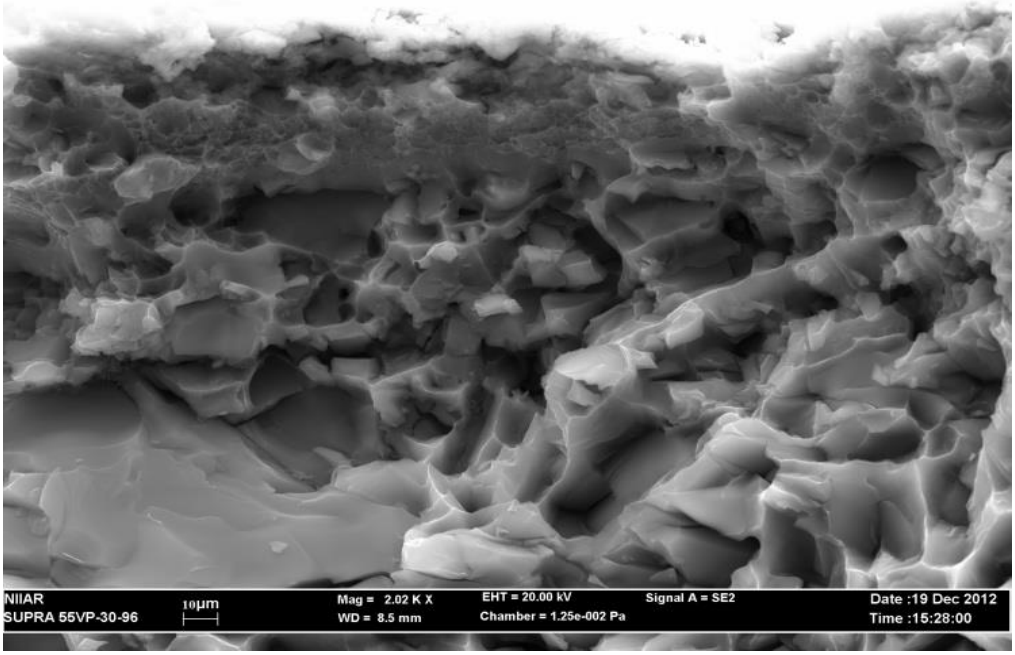


Рисунок 3. Поверхность излома поверхностного оксидного слоя

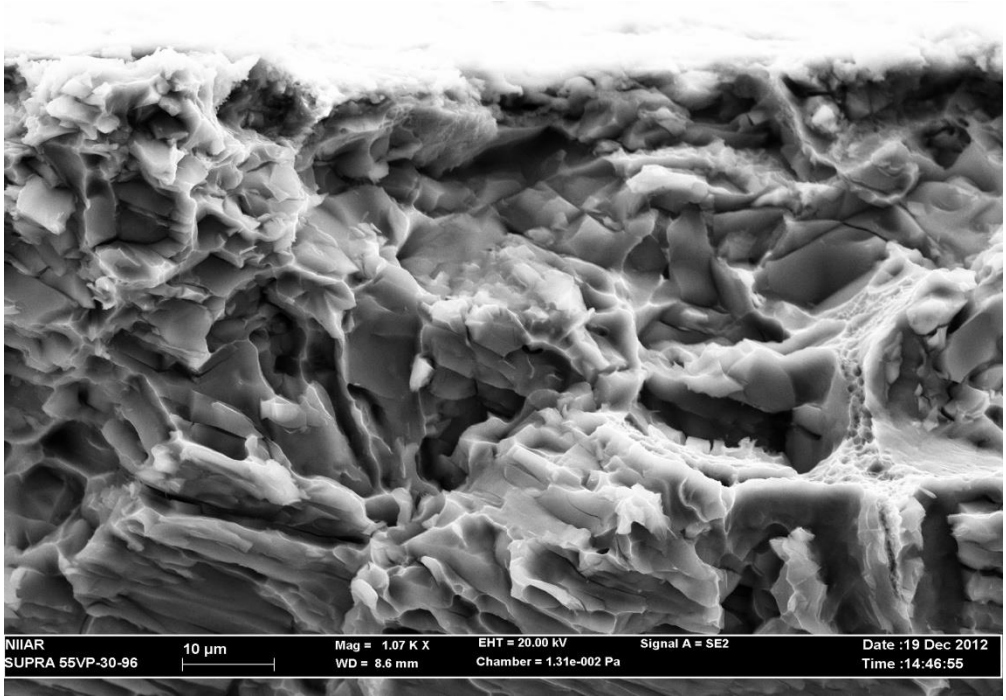


Рисунок 4. Поверхности излома рабочего оксидного слоя

Результаты исследований согласуется с данными работ [11, 12, 13].

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.

Используемые источники:

1. Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учеб. для вузов / Д.Н. Выборнов [и др.]; 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 [Текст]: учеб. для вузов / В.П. Бугаев. – М.: Колос, 1981. – 209 с.

3. Способ тепловой защиты днища поршня: а.с. №585034 СССР: МПК В 23 Р 3/02 / Сергеев А.В., Казаков Н.Ф., Смирнова Т.Н., Болдырев И.В; заявл. 20.07.76; опубл. 25.12.77, Бюл. № 47 (53). – 2 с.

4. Кавтарадзе, Р.З. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля [Текст] / Р. З. Кавтарадзе [и др.] // Вестн. 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. / Д.А. Сибриков – Новосибирск, 2004. – 18 с.

6. Казанцев И.А. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография [Текст] / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков – Инф. изд. центр Пенз ГУ, 2007. – 239с.

7. Казанцев, И.А. Теплофизические характеристики поршней ДВС с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности [Текст] / И.А. Казанцев [и др.] // VIII Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков": сб. статей. – Пенза. – 2003. – Ч. 1 – С. – 264-266.

8. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Текст]: ГОСТ 9450 – 1976. – Введ. 1977–02–02. – М.: Изд-во стандартов, 2. – IV, 22 с.: ил.

9. Покрытия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля) [Текст]: ГОСТ 9.302 – 1988. – Введ. 1989–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1. – IV, 24 с.: ил.

10. Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ [Текст]: в 2-х книгах. Книга 2. Пер. с анг. / Гоулдстейн Дж. [и др.]. – М.: Мир, 1984. – 384с.

11. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана, и их сплавов [Текст]: пат. Рос. Федерация: МПК F 02 F 3/12 Казанцев И.А., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Хохлов А.Л., Степанов В.А., Сафаров К.У.; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. – № 2010140537/02; заявл. 04.10.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. – 3 с: ил.

12. Казанцев, И.А., Бычков, В.И., Казанцев, А.И. Теплофизические характеристики поршней двигателей внутреннего сгорания с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности [Текст] // Аллея Науки. – 2018. – № 5 (21) – С. 34 – 41.

13. Казанцев, И.А., Бычков, В.И., Казанцев, А.И. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания [Текст] / И.А. Казанцев. В.И. Бычков. А.И. Казанцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – С 107 – 119.