УДК 621.43.055 EDN: JNGDCE

ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПОРШНЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ

В.М. Ситдиков ven_s80@mail.ru
Н.Ю. Дударева dudareva.nyu@ugatu.su

УУНиТ, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано влияние керамического покрытия, сформированного на днище поршня с помощью технологического метода микродугового оксидирования, на эксплуатационные показатели двигателя внутреннего сгорания. Испытания проводили на базе четырехтактного бензинового двигателя УМЗ-341 на специально спроектированном и изготовленном стенде на шести режимах, которые отличались мощностью нагрузочного генератора и частотой вращения коленчатого вала двигателя. Сначала при испытаниях использовали штатный поршень, а затем поршень, на днище которого сформировано керамическое покрытие. В результате эксперимента доказано, что покрытие повышает эксплуатационные показатели двигателя, а именно уменьшается расход топлива и, следовательно, увеличивается коэффициент полезного действия. Описанный эффект отмечен на режимах с высокими оборотами коленчатого вала (3200 мин$^{-1}$). Наибольшее увеличение коэффициента полезного действия наблюдалось на режиме работы двигателя 3200 мин$^{-1}$ и 500 Вт и составило 9 %. На этом же режиме получено наибольшее уменьшение расхода топлива, которое составило 0,117 кг/ч. Одновременно наблюдалось снижение температуры отработавших газов. Предположено, что обнаруженный эффект связан с каталитическим действием покрытия на рабочий процесс двигателя

Ключевые слова

Двигатель внутреннего сгорания, поршень, микродуговое оксидирование, керамическое покрытие, расход топлива, коэффициент полезного действия, коэффициент избытка воздуха

Поступила 25.02.2026
Принята 08.05.2026
© Автор(ы), 2026

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (№ FRRR-2026-0006)

Введение. Детали цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) эксплуатируются в сложных условиях**,** обусловленных значительными механическими, тепловыми и инерционными нагрузками. Наиболее напряженным условиям эксплуатации подвергаются поршни ДВС. В результате возвратно-поступательных движений поршней происходит трение и износ их поверхностей, а в процессе сгорания топливовоздушной смеси наблюдается химическое воздействие продуктов сгорания на материал поршня, что приводит к коррозии деталей [1, 2]. Воздействие указанных негативных факторов усиливает высокая температура в камере сгорания двигателя, которая также является причиной снижения механических свойств материала поршней. Такие условия эксплуатации предъявляют особые требования к материалу поршня и защите его поверхностей от негативных факторов.

Для повышения надежности и долговечности поршней на их поверхностях обычно формируют покрытия с высокой износостойкостью, которые способны защитить детали от высоких температур и коррозии [3]. Широкую популярность в этой сфере приобрели керамические покрытия, получаемые с помощью технологического метода микродугового оксидирования (МДО) — МДО-покрытия [4–6]. Эта технология получила довольно широкое распространение для создания многофункциональных покрытий для деталей, выполненных из алюминиевых, титановых и магниевых сплавов [7–10]. Метод МДО позволяет формировать керамические покрытия, состоящие из оксидов металла, толщиной до 400 мкм, с высокими микротвердостью (до 22 ГПа), износостойкостью, адгезионной прочностью (даже при повышенных температурах) и теплозащитными свойствами [11]. Такое сочетание показателей создает широкую перспективу применения МДО-покрытий для защиты деталей, работающих в экстремальных условиях, которые наблюдаются в камере сгорания ДВС.

Изначально МДО-покрытия начали применять для снижения износа гильз цилиндров и юбок поршней [12–14]. Затем, учитывая низкую теплопроводность МДО-покрытий, их стали использовать для защиты днищ поршней от прогара [15, 16], одновременно зафиксировано влияние керамического покрытия на снижение токсичности отработавших газов [17]. Во всех вышеперечисленных применениях МДО-покрытие показало высокую эффективность. Однако при проведении моторных испытаний в целом ряде исследований зафиксировано влияние этих покрытий на эксплуатационные показатели двигателей. Например, в [18–20] при исследовании теплозащитных свойств МДО-покрытий на поршнях зафиксировано увеличение максимального крутящего момента и эффективной

мощности двигателя, также отмечено уменьшение часового и удельного эффективных расходов топлива. В [21] показано, что МДО-покрытие днища поршня приводит к увеличению более чем на 20 % мощности тепловозного дизельного двигателя. В [22] отмечено, что корундовое покрытие днищ поршней и кольцевого пояса приводит к уменьшению на 1,7…10 % расхода топлива во всем диапазоне скоростей бензинового двигателя.

В результате анализа литературных данных выявили недостаточную изученность влияния МДО-покрытий деталей камеры сгорания на эксплуатационные показатели двигателей, а также противоречивость имеющихся экспериментальных результатов.

Цель настоящей работы — исследовать влияние керамического покрытия, сформированного на днище поршня с помощью МДО-метода, на эксплуатационные показатели двигателей.

Материалы и методы. Для проведения экспериментов выбран одноцилиндровый четырехтактный бензиновый двигатель УМЗ-341 с воздушной системой охлаждения и системой зажигания МБ-23У (бесконтактное магнето). Выбор данного двигателя обусловлен удобством его конструкции и эксплуатации, а также тем, что его поршень выполнен из алюминиевого сплава, что позволяет формировать на его поверхностях качественные МДО-покрытия. Рабочие параметры двигателя УМЗ-341 следующие: мощность 5,88 кВт; степень сжатия 7,4; рабочий объем 333,3 $см^3$; максимальный крутящий момент 17,2 Н · м; минимальные (1600 $мин^{-1}$) и максимальные (3600 $мин^{-1}$) обороты; диаметр поршня 79 мм; ход поршня 68 мм; бензин АИ-92[1].

Для изготовления штатного поршня двигателя УМЗ-341 применяется сплав АК12 (ГОСТ 1583–93). Данный сплав содержит 10…13 % Si. Более подробный химический состав этого сплава следующий: 0,6 % Cu; 0,3 % Zn; 0,1 % Mg; 1,5 % Fe; 0,5 % Mn; 0,1 % Ti; остальное Al [23]. На сплаве АК12 формируются качественные МДО-покрытия, свойства которых довольно хорошо исследованы. Кроме того, для сплава АК12 известны МДО-режимы, позволяющие формировать керамические покрытия с требуемыми свойствами [24].

Для проведения исследований на днище экспериментального поршня сформировано МДО-покрытие. Покрытие получали в силикатно-

[1] Руководство по эксплуатации двигатели УМЗ-341 и УМЗ-341Э. Уфа, УМПО, 2010.

щелочном электролите с использованием емкостной установки. Электролит содержал 4 г/л КОН (едкого калия) и 4 г/л Na_2SiO_3 (метасиликата натрия). В процессе МДО напряжение на аноде 280…300 В, на катоде 50…75 В, плотность тока в диапазоне 12…15 А/дм^2. Продолжительность обработки днища поршня 90 мин. Процесс формирования МДО-покрытия днища поршня приведен на рис. 1.

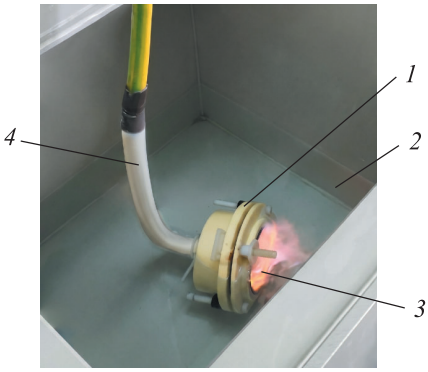
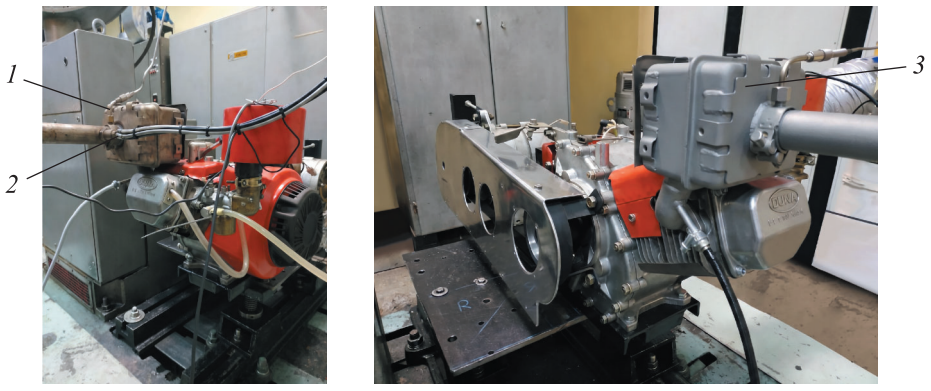


Рис. 1. Процесс формирования МДО-покрытия днища поршня:
1 — приспособление для МДО-покрытия; *2* — электролит; *3* — поверхность днища поршня; *4* — токоподвод

После нанесения МДО-покрытия с поверхности днища поршня удаляли верхний рыхлый слой, доводя толщину покрытия до значения ~ 120 мкм. Для удаления рыхлого слоя использовали абразивный материал — наждачную бумагу типа Р2000 (ГОСТ 52381–2005). Толщину покрытия контролировали с помощью портативного универсального вихретокового толщиномера марки ТТ-210. Толщину покрытия измеряли в 10 точках на поверхности днища поршня. Итоговая толщина покрытия составила 121 ± 5 мкм.

Моторные испытания двигателя проводили на специально спроектированном и изготовленном стенде (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Виды слева (*а*) и справа (*б*) стенда для моторных испытаний:
1 — зонд для измерения температуры отработавших газов; *2* — широкополосный лямбда-зонд; *3* — глушитель

Для проведения моторных испытаний экспериментальный двигатель крепили на металлическую станину. В качестве нагрузочного устройства использовали генератор Г-290, на который с помощью ременной передачи передавался крутящий момент. Необходимый уровень нагрузки генератора обеспечивали с помощью электронного нагрузочного стенда *ELECTRONIC LOAD AF-AL 9750-120* (Германия). Расход топлива измеряли, используя систему *AVL Fuel Balance* (Австрия). Температуру головки блока цилиндра и отработавших газов фиксировали приборами ТРМ200 и АКТАКОМ АТТ-2006. Температурный датчик прибора ТРМ200 установлен под свечой зажигания, а датчик прибора АКТАКОМ АТТ-2006 — в выпускной трубе. Параметры топливовоздушной смеси (соотношение воздух–топливо) регистрировали с помощью широкополосного цифрового анализатора *Innovate LM-2* (Германия). Первичный измерительный преобразователь — широкополосный лямбда-зонд *Bosch Oxygen Sensor*, расположен в выпускной трубе. Схема испытательного стенда, в состав которого входит двигатель УМЗ-341, приведена на рис. 3.

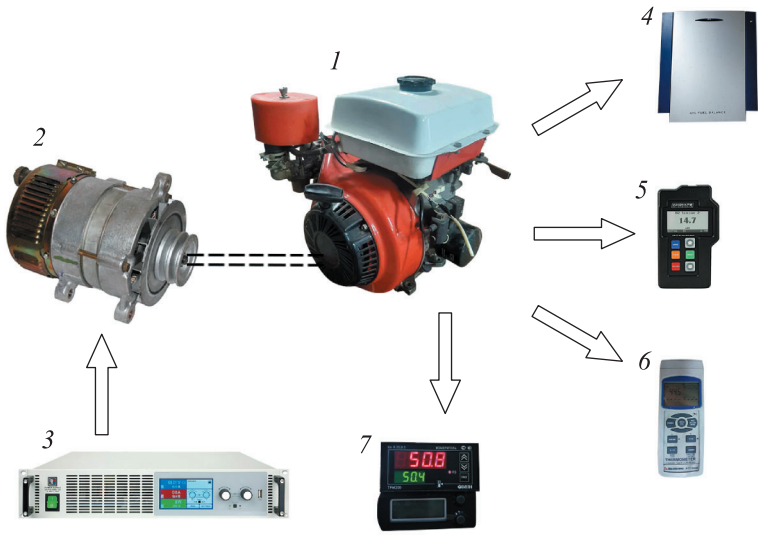
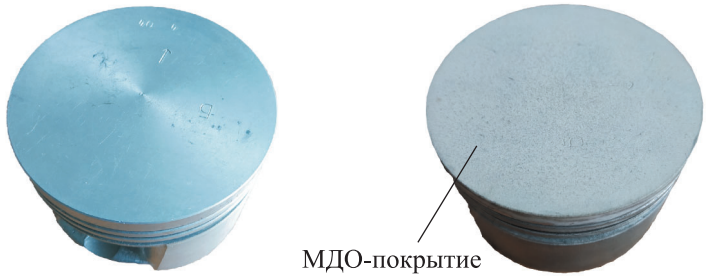


Рис. 3. Схема испытательного стенда с двигателем:

1 — двигатель УМЗ-341; *2* — генератор Г-290; *3* — электронный нагрузочный стенд *ELECTRONIC LOAD AF-AL 9750*-120; *4* — расходометр *AVL Fuel Balance*; *5* — измеритель коэффициента избытка воздуха *Innovate LM-2*; *6* — измеритель температуры отработавших газов АКТАКОМ АТТ-2006; *7* — измеритель температуры головки цилиндра ТРМ200

Для оценки влияния покрытия поршня на эксплуатационные показатели двигателя выполнены моторные испытания с двумя типами порш-

ней поочередно: сначала со штатным (стандартным) поршнем (рис. 4, *а*), а затем с поршнем, на днище которого сформировано МДО-покрытие (рис. 4, *б*).



а *б*

Рис. 4. Штатный (*а*) поршень двигателя до проведения испытаний и поршень с МДО-покрытием (*б*)

Испытания двигателя проводили на шести режимах, параметры испытаний двигателя УМЗ-341 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры испытаний двигателя УМЗ-341

Номер режима	Частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$	Нагрузка генератора, Вт	Крутящий момент генератора, Н · м
1	3200	1500	4,48
2		1000	2,98
3		500	1,49
4	2700	1000	3,54
5		500	1,77
6	2400	500	1,99

Методика испытаний двигателя УМЗ-341 едина на всех режимах и включала в себя следующие операции.

Подготовка — крепление двигателя на стенде, подключение необходимого оборудования и измерительной аппаратуры.

Предварительный режим — запуск и прогрев двигателя на режиме холостого хода.

Скоростной режим — 3200 мин$^{-1}$ при нагрузках 1500, 1000 и 500 Вт; 2700 мин$^{-1}$ при 1000 и 500 Вт; 2400 мин$^{-1}$ при 500 Вт, последовательная регистрация эксплуатационных показателей.

Окончание работы — перевод двигателя на режим холостого хода, выдержка на этом режиме ~ 5 мин и глушение.

На каждом режиме замеряли удельный расход топлива g_e, коэффициент избытка воздуха α, а также температуру отработавших газов $T_{\text{о.г}}$ и температуру головки цилиндра $T_{\text{гол}}$. После окончания работы двигатель выводили на режим холостого хода, выдерживали на этом режиме не менее 5 мин и глушили. Двигатель, находящийся в заглушенном состоянии, остывал не менее 10 мин. На каждом режиме осуществлялось три замера через каждые 30 с. Испытания двигателя с одним типом поршней на всех режимах (см. табл. 1) повторяли пять раз. Таким образом, общее число измерений на одном экспериментальном режиме составило 15.

Экспериментальные данные по расходу топлива и температурам обрабатывались на основе методов статистики [25]. Для штатного поршня и поршня с МДО-покрытием измеренные значения сравнивали с помощью парного t-критерия Стьюдента на основе уравнения [26]:

$$t = \frac{\left|\overline{X_1} - \overline{X_2}\right|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}, \tag{1}$$

где $\overline{X_1}$ и $\overline{X_2}$ — средние арифметические значения двух выборок: для штатного поршня и поршня с МДО-покрытием; S_1 и S_2 — среднеквадратическое отклонение двух выборок; n_1 и n_2 — число измерений для каждой выборки (в данном эксперименте $n_1 = n_2 = 15$).

При анализе полученных результатов рассчитывали изменение КПД экспериментального двигателя при использовании разных типов поршней. Расчеты основаны на формуле [27]:

$$\eta = \frac{P\,t}{g_e\,H_u}, \tag{2}$$

где P — мощность; t — время; H_u — теплота сгорания топлива.

Поскольку теплотворная способность топлива остается постоянной, оценку изменения КПД получали на основе уравнения из формулы (2):

$$\Delta\eta = \frac{\eta_{\text{кер}} - \eta_{\text{шт}}}{\eta_{\text{шт}}} \cdot 100\ \% = \left(\frac{g_{e\,\text{шт}}}{g_{e\,\text{кер}}} - 1\right) \cdot 100\ \%, \tag{3}$$

где $\eta_{\text{кер}}$ и $\eta_{\text{шт}}$ — КПД при использовании керамического (с покрытием) и штатного поршня; $g_{e\text{кер}}$ и $g_{e\text{шт}}$ — удельный расход топлива при использовании керамического и штатного поршня.

Результаты. Расход топлива двигателя при испытании поршней разных типов, изменения расхода топлива и КПД двигателя, а также сравнение полученных результатов на основе парного *t*-критерия Стьюдента приведены в табл. 2. Полужирным выделены статистически значимые изменения в расходе топлива при использовании различных типов поршней.

Таблица 2

Данные по расходу топлива, изменению КПД, *t*-критерию Стьюдента

Номер режима	Расход топлива двигателя с поршнем, кг/ч		Изменение расхода топлива двигателя		Изменение КПД двигателя $\Delta\eta$, %	Парный *t*-критерий Стьюдента
	без покрытия $g_{e\,\text{шт}}$	с покрытием $g_{e\,\text{кер}}$	Δg_e, кг/ч	Δg_e, %		
1	1,645 ± 0,001	1,599 ± 0,010	**0,046**	**2,8**	**2,9**	**4,61**
2	1,525 ± 0,012	1,431 ± 0,007	**0,093**	**6,1**	**6,6**	**7,49**
3	1,411 ± 0,028	1,294 ± 0,007	**0,117**	**8,3**	**9,0**	**4,06**
4	1,207 ± 0,032	1,236 ± 0,035	–0,078	–6,6	–2,3	1,69
5	1,107 ± 0,023	1,090 ± 0,039	0,018	1,6	1,7	0,39
6	0,886 ± 0,018	0,887 ± 0,043	–0,001	–0,15	-0,1	0,03

Согласно табл. 2, применение поршня с МДО-покрытием приводит к уменьшению расхода топлива, а значит, и к увеличению КПД двигателя.

Измеренные значения температуры отработавших газов и головки блока цилиндров при использовании штатного поршня и поршня с МДО-покрытием приведены в табл. 3. Полужирным выделены статистически значимые изменения температуры при использовании различных поршней.

Таблица 3

Температура отработавших газов и головки блока цилиндров

Номер режима	$T_{\text{о.г}}$, °С, для поршня		$T_{\text{гол}}$, °С, для поршня	
	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием
1	482 ± 61	472 ± 4	107,2 ± 0,3	107,3 ± 0,4
2	**497 ± 7**	**473 ± 4**	104,2 ± 0,9	103,2 ± 1,7
3	**486 ± 13**	**453 ± 6**	99,4 ± 1,4	98,7 ± 1,3
4	411 ± 16	417 ± 4	101,7 ± 0,8	101,5 ± 1,2
5	423 ± 16	418 ± 17	97,8 ± 0,8	98,6 ± 1,5
6	367 ± 25	381 ± 15	**97,2 ± 1,5**	**98,8 ± 1,4**

Сравнение значений коэффициента избытка воздуха α, полученных для двух типов поршней, приведено на рис. 5. Ключевым результатом данных наблюдений является устойчивое уменьшение коэффициента α при всех испытательных режимах в случае использования поршня с МДО-покрытием по сравнению со штатным поршнем. Максимальное уменьшение ($\Delta\alpha = 0,05$) зарегистрировано на режимах № 1, 4 и 6, а среднее значение уменьшения на режимах № 1–6 составило 0,04.

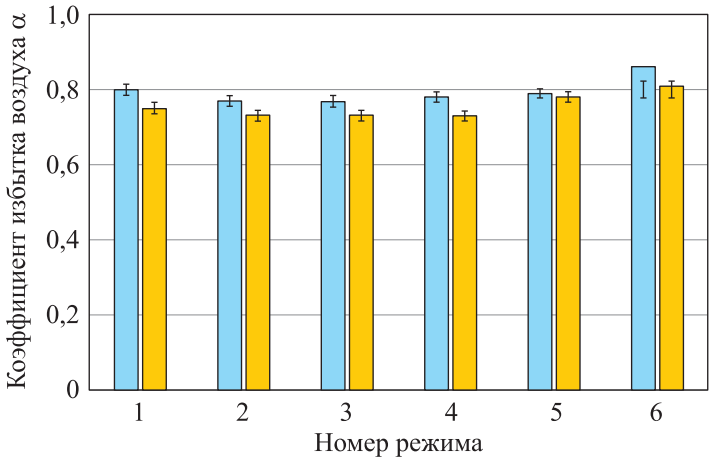


Рис. 5. Сравнение значений коэффициента избытка воздуха для штатного поршня (▭) и поршня с МДО-покрытием (▭)

Обсуждение результатов. В результате анализа выявлено, что наличие МДО-покрытия на днище поршня позволяет уменьшить расход топлива при работе четырехтактного двигателя, тем самым увеличив его КПД. Критическое значение *t*-критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 для 15 параллельных измерений составляет 2,15 [26]. Таким образом, статистически значимые различия по расходу топлива между штатным поршнем и поршнем с МДО-покрытием наблюдаются только на высокоскоростных режимах — при частоте вращения 3200 мин$^{-1}$ (режимы № 1–3). Максимальное уменьшение расхода топлива, составившее 0,117 кг/ч, зафиксировано на режиме № 3, характеризующемся высокой частотой вращения 3200 мин$^{-1}$ и малой нагрузкой 500 Вт. Статистически значимого эффекта не было отмечено на режимах № 4–6. Среднее значение снижения расхода топлива на всех шести режимам составило 0,038 кг/ч.

Наблюдаемое среднее значение увеличения КПД по всем экспериментальным режимам двигателя составило 3,1 %, а на высокоскоростных

режимах (3200 мин$^{-1}$) — 6,2 %. На режимах № 4–6 изменения зафиксированы не были. Максимальное увеличение КПД составило 9 % на оборотах 3200 мин$^{-1}$ при генераторной мощности 500 Вт.

С помощью корреляционного анализа определено, что на изменение КПД влияет один фактор — скорость вращения коленчатого вала двигателя. Сила связи n^2 и $\Delta\eta$, выраженная индексом корреляции по шкале Чеддока, составила 0,83, что указывает на высокую (сильную) связь между этими параметрами [25].

В результате анализа и статистической обработки данных температуры (см. табл. 3) выявлено, что наличие МДО-покрытия на днище поршня способствует не только уменьшению расхода топлива и увеличению КПД двигателя, но и снижению температуры отработавших газов при работе на высоких скоростях. Индекс корреляции между значениями увеличения КПД и изменения температуры составил 0,95, что указывает на высокую связь между параметрами. На режимах № 4–6 статистического значимого изменения температуры отработавших газов не зафиксировано. Изменений температуры головки не зафиксировано на всех режимах, кроме режима № 6. На режиме № 6 (2400 мин$^{-1}$ и 500 Вт) наблюдается незначительное повышение на 1,6 °C (1,64 %) температуры головки блока цилиндров.

По результатам проведенных исследований можно утверждать, что МДО-покрытие на днище поршня двигателя приводит к уменьшению расхода топлива и увеличению КПД на высокоскоростных режимах. При этом увеличение КПД сопровождается снижением температуры отработавших газов двигателя.

Описанный эффект можно объяснить, основываясь на тепловом балансе двигателя. Известно, что теплота, выделяющаяся при сгорании топлива в ДВС, расходуется на совершение работы двигателем, на нагрев деталей и повышение температуры отработавших газов. Уменьшение теплового потока из камеры сгорания, благодаря низкой теплопроводности МДО-покрытия, может привести либо к повышению температуры отработавших газов, либо к увеличению КПД двигателя. Однако в данном эксперименте увеличение КПД наблюдается с одновременным снижением температуры отработавших газов. Следует отметить уменьшение коэффициента избытка воздуха α при использовании поршней с покрытием на всех режимах испытаний, что с одновременным уменьшением расхода топлива способствует повышению полноты сгорания топлива.

Основываясь на данных фактах, можно предположить, что МДО-покрытие, с одной стороны, выступает в качестве теплоизолирующего, а с другой — каталитического покрытия. В совокупности происходит увеличение КПД двигателя как за счет уменьшения тепловых потоков из камеры сгорания [28], так и за счет влияния покрытия на полноту сгорания топлива. Этот эффект наиболее ярко проявляется при высоких оборотах двигателя, когда из-за сокращения продолжительности цикла температура в камере сгорания и каталитические свойства покрытия повышаются [28, 29].

Заключение. Экспериментально доказано, что МДО-покрытие днища поршня повышает эксплуатационные показатели четырехтактного бензинового двигателя, а именно уменьшает расход топлива и, соответственно, увеличивает его КПД.

Увеличение КПД происходит на режимах с высокими оборотами двигателя и низкой нагрузкой. Максимальное увеличение КПД (на 9 %) наблюдается на 3200 мин$^{-1}$ при генераторной мощности 500 Вт.

Применение поршня с МДО-покрытием на высокоскоростных режимах приводит к снижению температуры отработавших газов, что позволяет предположить не только теплоизолирующий эффект, но и каталитическое влияние этого покрытия на процесс сгорания топлива.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Муратаев Ф.И. Исследование причин повреждения литых композитных поршней двигателей внутреннего сгорания. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2024, т. 80, № 3, с. 64–70. EDN: ABZOIJ

[2] Li Z., Li J., Chen Z., et al. Experimental and computational study on thermo-mechanical fatigue life of aluminium alloy piston. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2021, vol. 44, no. 1, pp. 141–155. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.13342

[3] Денисов В.А., Попов Н.А. Исследование износостойкости гильз цилиндров, восстановленных керамическим покрытием. *Технический сервис машин*, 2024, т. 62, № 1, с. 101–106. DOI: https://doi.org/10.22314/2618-8287-2024-62-1-101-106

[4] Цыденов А.Г., Сокорев А.А. Плазменно-электролитическое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов. *Литейное производство*, 2023, № 11, с. 14–16. EDN: CQBGFC

[5] Кривенков А.О., Батрашов В.М., Киселев И.В. и др. Теплопроводность материалов с оксидокерамическими покрытиями, полученными микродуговым оксидированием. *Транспортное машиностроение*, 2025, № 12, с. 87–93. DOI: https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-12-87-93

[6] Серикбекулы Н., Орманбеков К.Д., Шынарбек А.Б. и др. Перспективы использования микродугового оксидирования в производстве авиационных и автомобильных компонентов. *Вестник университета Шакарима. Сер. Технические науки*, 2024, № 3, с. 71–78. DOI: https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-3(15)-11

[7] Чавдаров А.В. Закономерности формирования МДО-покрытий на алюминиевых сплавах. *Технический сервис машин*, 2025, т. 63, № 1, с. 69–74.
DOI: https://doi.org/10.22314/2618-8287-2025-63-1-69-74

[8] Zaynullina L.I., Sharipov I.Z., Gunderov D.V., et al. Effect of cyclic heating on the properties of PEO coatings on an UFG TI–18ZR–15NB alloy. *Russ. Metall.*, 2024, vol. 2024, no. 8, pp. 1797–1802. DOI: https://doi.org/10.1134/S0036029525700338

[9] Комаров А.И., Романюк А.С., Шипалов Д.А. Формирование, структура и свойства модифицированного форстеритом МДО-покрытия на магниевом сплаве МЛ10. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2022, № 4, с. 61–67.
DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-61-67

[10] Суминов И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 2. М., Техносфера, 2011.

[11] Дударева Н.Ю. Теплопроводность тонких керамических покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования. М.; Вологда, Инфра-Инженерия, 2025.

[12] Захаров А.С., Багайсков Ю.С. Исследование технологических методов повышения прочности поверхности цилиндров блоков ДВС из алюминиевых сплавов. *Известия ВолгГТУ*, 2024, № 8, с. 18–20.
DOI: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-8-291-18-20

[13] Чавдаров А.В. Применение технологии МДО для двигателей внутреннего сгорания. *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*, 2021, № 10, с. 37–41. DOI: https://doi.org/10.33920/sel-10-2110-05

[14] Аль-Бдейри М.Ш., Дубровина Н.А., Сергеев С.В. Модификация поверхности алюминиевого сплава АК12ММГН гальваноплазменным методом с целью повышения эксплуатационных характеристик поршней ДВС. *Технология машиностроения*, 2021, № 6, с. 5–11. EDN: SZQSQK

[15] Валеев Р.С., Еникеев Р.Д., Сакулин Р.Ю. Повышение стойкости поршней двухтактных ДВС к прогару посредством нанесения МДО-покрытий. *Двигателестроение*, 2020, № 2, с. 30–34. EDN: KCLJEJ

[16] Дударева Н.Ю., Коломейченко А.В., Кисель Ю.Е. Эффективность тепловой защиты поршней ДВС покрытием, сформированным микродуговым оксидированием. *Тракторы и сельхозмашины*, 2024, т. 91, № 1, с. 101–112.
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629

[17] Дударева Н.Ю., Ситдиков В.М. Снижение токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания с помощью керамического покрытия на деталях камеры сгорания. *Двигателестроение*, 2023, № 3, с. 61–70. EDN: HSGZEP

[18] Rajan A.G., Nithish A.B., Ramprakaash S., et al. Analysis of performance characteristics of an internal combustion engine with thermal barrier coated piston. *IJETER,* 2021, vol. 9, no. 4, pp. 455–459. DOI: https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/21942021

[19] Парсаданов И.В., Поливянчук А.П. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами. *Двигатели внутреннего сгорания*, 2009, № 2, с. 97–100.

[20] Казанцев И.А., Бычков В.И., Казанцев А.И. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики ДВС. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2018, № 2, с. 107–118. DOI: https://doi.org/10.21685/2072-3059-2018-2-10

[21] Марченко А.П., Шпаковский В.В. Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания*, 2011, № 2, с. 24–28. EDN: TSIWMF

[22] Шпаковский В.В., Линьков О.Ю. Анализ эффективности применения поршней с корундовым слоем для снижения расхода топлива. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2008, № 10, с. 140–144.

[23] Зайнуллина А.Р., Зайнуллина Л.И., Мотков М.М. и др. Влияние термообработки на микроструктуру и свойства сплава АЛ30, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор. *Materials. Technologies. Design*, 2025, т. 7, № 1, с. 14–20. EDN: GBOFYX

[24] Dudareva N.Yu., Kolomeichenko A.V., Deev V.B., et al. Porosity of oxide ceramic coatings formed by micro-arc oxidation on high-silicon aluminum alloys. *J. Surf. Investig.*, 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1308–1314. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451022060362

[25] Пепелышев Д.И., Воробьев Д.А. Сравнительный анализ реализации корреляционного анализа в Microsoft Excel и Libreoffice Calc. *Научное обозрение. Технические науки*, 2024, № 6, с. 24–31. EDN: CVLWWG

[26] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 1976.

[27] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw Hill, 1988.

[28] Dudareva N.Yu. Influence of the piston crown ceramic coating on the thermal state of engine parts and heat flows distribution in the combustion chamber. *Russ. Aeronaut.*, 2025, vol. 68, no. 1, pp. 117–124. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068799825010131

[29] Ситдиков В.М. Наноструктурные каталитические покрытия для поршней двигателей внутреннего сгорания. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, УУНиТ, 2025.

Ситдиков Венер Мунирович — канд. техн. наук, начальник учебной части, заместитель начальника военного учебного центра УУНиТ (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32).

Дударева Наталья Юрьевна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» УУНиТ (Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ситдиков В.М., Дударева Н.Ю. Влияние керамического покрытия поршней на эксплуатационные показатели двигателя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 3 (158), с. 143–159. EDN: JNGDCE

EFFECT OF CERAMIC PISTON COATING ON ENGINE PERFORMANCE

V.M. Sitdikov ven_s80@mail.ru
N.Yu. Dudareva dudareva.nyu@ugatu.su

UUST, Ufa, Russian Federation

Abstract

The article studies the effect of a ceramic coating formed on the piston crown using micro-arc oxidation on the performance of an internal combustion engine. Tests were conducted on a four-stroke UMZ-341 engine, using a specially designed and manufactured rig, in six operating modes that varied in load generator power and engine crankshaft speed. Tests were conducted first with a standard piston, and then with a piston with a ceramic coating on the crown. The experiment demonstrated that the coating improves engine performance, namely, reduces fuel consumption and, accordingly, increases its efficiency. This effect is observed at high speeds. The greatest increase in efficiency was observed at the 3200 min^{-1} and 500 W engine operating mode and amounted to 9 %. The greatest reduction in fuel consumption was also noted in this mode, amounting to 0.117 kg/h. A decrease in exhaust gas temperature was simultaneously observed. This effect is believed to be related to the coating's catalytic effect on engine operation

Keywords

Internal combustion engine, piston, micro-arc oxidation, ceramic coating, fuel consumption, efficiency, excess air coefficient

Received 25.02.2026
Accepted 08.05.2026
© Author(s), 2026

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment (no. FRRR-2026-0006)

REFERENCES

[1] Murataev F.I. Investigation of the causes of damage to cast composite pistons of internal combustion engines. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2024, vol. 80, no. 3, pp. 64–70 (in Russ.). EDN: ABZOIJ

[2] Li Z., Li J., Chen Z., et al. Experimental and computational study on thermo-mechanical fatigue life of aluminium alloy piston. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*., 2021, vol. 44, no. 1, pp. 141–155. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.13342

[3] Denisov V.A., Popov N.A. The wear resistance of cylinder liners restored by ceramic coating. *Tekhnicheskiy servis mashin* [Machinery Technical Service], 2024, vol. 62, no. 1, pp. 101–106 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.22314/2618-8287-2024-62-1-101-106

[4] Tsydenov A.G., Sokorev A.A. Technology of plasma-electrolytic oxidation of aluminum alloy parts. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technology And Equipment], 2023, no. 11, pp. 14–16 (in Russ.). EDN: CQBGFC

[5] Krivenkov A.O., Batrashov V.M., Kiselev I.V., et al. Thermal conductivity of materials with oxide-ceramic coatings, obtained by microarc oxidation. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport Engineering], 2025, no. 12, pp. 87–93 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30987/2782-5957-2025-12-87-93

[6] Serikbekuly N., Ormanbekov K.D., Shynarbek A.B., et al. Prospects for the use of microarc oxidation in the production of aviation and automotive components. *Vestnik universiteta Shakarima. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences], 2024, no. 3, pp. 71–78 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-3(15)-11

[7] Chavdarov A.V. Patterns of formation of PEO-coatings on aluminum alloys. *Tekhnicheskiy servis mashin* [Machinery Technical Service], 2025, vol. 63, no. 1, pp. 69–74 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.22314/2618-8287-2025-63-1-69-74

[8] Zaynullina L.I., Sharipov I.Z., Gunderov D.V., et al. Effect of cyclic heating on the properties of PEO coatings on an UFG TI–18ZR–15NB alloy. *Russ. Metall*., 2024, vol. 2024, no. 8, pp. 1797–1802. DOI: https://doi.org/10.1134/S0036029525700338

[9] Komarov A.I., Romanyuk A.S., Shipalov D.A. Formation, structure and properties of modified with forsterite microarc oxidation coating on МЛ10 (ML10) magnesium alloy. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2022, no. 4, pp. 61–67 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-61-67

[10] Suminov I.V. Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov. T. 2 [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys. Vol. 2]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011.

[11] Dudareva N.Yu. Teploprovodnost tonkikh keramicheskikh pokrytiy, formiruemykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya [Thermal conductivity of thin ceramic coatings formed by microarc oxidation]. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2025.

[12] Zakharov A.S., Bagayskov Yu.S. Research of technological methods of increase of strength of surface of cylinders of internal combustion engine blocks from aluminum alloys. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2024, no. 8, pp. 18–20 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-8-291-18-20

[13] Chavdarov A.V. Application of MDO technology for internal combustion engines. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* [Agricultural Machinery: Service and Repair], 2021, no. 10, pp. 37–41 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.33920/sel-10-2110-05

[14] Al-Bdeyri M.Sh., Dubrovina N.A., Sergeev S.V. Modification of the surface of the AK12MMGN aluminum alloy by the galvanoplasma method to improve the performance characteristics of internal combustion engine pistons. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2021, no. 6, pp. 5–11 (in Russ.). EDN: SZQSQK

[15] Valeev R.S., Enikeev R.D., Sakulin R.Yu. Micro-weld oxidation as a means to prevent burnout of 2-stroke engine piston. *Dvigatelestroenie* [Engines Construction], 2020, no. 2, pp. 30–34 (in Russ.). EDN: KCLJEJ

[16] Dudareva N.Yu., Kolomeychenko A.V., Kisel Yu.E. The efficiency of thermal protection of ICE pistons with the micro-arc oxidation. *Traktory i selkhozmashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2024, vol. 91, no. 1, pp. 101–112 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629

[17] Dudareva N.Yu., Sitdikov V.M. Reducing toxicity in the internal combustion engine exhaust gases by using ceramic coating on the combustion chamber components. *Dvigatelestroenie* [Engines Construction], 2023, no. 3, pp. 61–70 (in Russ.). EDN: HSGZEP

[18] Rajan A.G., Nithish A.B., Ramprakaash S., et al. Analysis of performance characteristics of an internal combustion engine with thermal barrier coated piston. *IJETER*, 2021, vol. 9, no. 4, pp. 455–459. DOI: https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/21942021

[19] Parsadanov I.V., Polivyanchuk A.P. Evaluation of the effect of galvanoplasma coating of automotive and tractor diesel pistons on particulate matter emissions with exhaust gases. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2009, no. 2, pp. 97–100 (in Russ.).

[20] Kazantsev I.A., Bychkov V.I., Kazantsev A.I. Impact of thermophysical properties of piston on the operational characteristics of internal combustion engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2018, no. 2, pp. 107–118 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.21685/2072-3059-2018-2-10

[21] Marchenko A.P., Shpakovskiy V.V. Corundum layer influence on working surfaces of pistons on process of combustion in ice. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2011, no. 2, pp. 24–28 (in Russ.). EDN: TSIWMF

[22] Shpakovskiy V.V., Linkov O.Yu. Analysis of the efficiency of using pistons with a corundum layer to reduce fuel consumption. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10, pp. 140–144 (in Russ.).

[23] Zaynullina A.R., Zaynullina L.I., Motkov M.M., et al. The influence of heat treatment on the microstructure and properties of AL30 alloy obtained by electromagnetic casting. *Materials. Technologies. Design*, 2025, vol. 7, no. 1, pp. 14–20 (in Russ.). EDN: GBOFYX

[24] Dudareva, N.Yu., Kolomeichenko A.V., Deev V.B., et al. Porosity of oxide ceramic coatings formed by micro-arc oxidation on high-silicon aluminum alloys. *J. Surf. Investig.*, 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1308–1314. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451022060362

[25] Pepelyshev D.I., Vorobyev D.A. Comparative analysis of the implementation of correlation analysis in Microsoft Excel and Libreoffice Calc. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical Science], 2024, no. 6, pp. 24–31 (in Russ.).
EDN: CVLWWG

[26] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Experimental planning in the search for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976.

[27] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York, McGraw Hill, 1988.

[28] Dudareva N.Yu. Influence of the piston crown ceramic coating on the thermal state of engine parts and heat flows distribution in the combustion chamber. *Russ. Aeronaut.*, 2025, vol. 68, no. 1, pp. 117–124. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068799825010131

[29] Sitdikov V.M. Nanostrukturnye kataliticheskie pokrytiya dlya porshney dvigateley vnutrennego sgoraniya. Dis. kand. tekh. nauk [Nanostructured catalytic coatings for pistons of internal combustion engines. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Ufa, UUNiT, 2025 (in Russ.).

Sitdikov V.M. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Academic Department, Deputy Head of the Military Training Center, UUST (Zaki Validi ul. 32, Ufa, 450076 Russian Federation).

Dudareva N.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Internal Combustion Engines, UUST (Zaki Validi ul. 32, Ufa, 450076 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sitdikov V.M., Dudareva N.Yu. Effect of ceramic piston coating on engine performance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 3 (158), pp. 143–159 (in Russ.). EDN: JNGDCE