

УДК 621.436.12

**Экспериментальное исследование теплового
состояния днища поршня ДВС с
теплозащитным слоем, сформированным
методом микродугового оксидирования**

Дударева Н. Ю.¹, Кальщиков Р. В.¹,
Домбровский О. П.¹, Бутусов И. А.^{1,*}

[*butusv.ilya@mail.ru](mailto:butusv.ilya@mail.ru)

¹Уфимский государственный авиационный технический
университет, Уфа, Россия

В данной статье приведены результаты экспериментального исследования эффективности снижения теплонапряжённости поршней двигателей внутреннего сгорания путем формирования теплозащитного покрытия на днище методом микродугового оксидирования (МДО). Испытания проводились на специально спроектированном и изготовленном безмоторном стенде, который позволяет создавать условия максимально приближенные к работе поршня реального двигателя. Исследовалось тепловое состояние штатного поршня двухтактного двигателя без тепловой защиты и поршня с теплозащитным слоем, сформированным на днище методом МДО. Результаты исследований показывают, что теплозащитный МДО-слой толщиной 100 мкм позволяет снизить теплонапряжённость поршня в среднем на 8,5 %.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, поршень, теплонапряжённость, теплозащитный слой, безмоторный стенд

Введение

Основным направлением развития современного двигателестроения является повышение технико-эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что сопровождается увеличением механических и тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы. В наибольшей степени подвержен тепловым нагрузкам поршень ДВС. Высокие температуры приводят к возникновению прогара поршня, который чаще всего проявляется в виде разрушения его днища. Прогар возникает в результате нарастания со значительным градиентом давления в камере сгорания и высокой температуры.

В процессе работы поршень совершает возвратно-поступательное движение с высокой скоростью – более 150 км/ч. Одновременно со стороны камеры сгорания на него действуют горячие газы, давление которых может достигать 8 МПа, а температура – 2500

°С. Возникающие термонапряжения, действующие совместно с циклическими напряжениями от давления газов и инерционных сил, могут послужить причиной разрушения днища поршня и привести к частичному или полному отказу двигателя. Обычно температура на днище поршня достигает 350...400 °С [1], однако форсирование двигателя может привести к увеличению этого значения. Рекомендуется не допускать нагрева поршней из алюминиевых сплавов более 450 °С [2], а по источнику [3] – более 350 °С, т.к. превышение этой температуры ведет к существенному снижению прочности материала.

Одним из основных направлений решения этой проблемы является применение на днище специальной теплоизоляции. Поэтому исследования, направленные на разработку способов нанесения теплозащитных покрытий на днище для локального ограничения подвода теплоты к поршню и улучшения эксплуатационных показателей современных и перспективных двигателей, представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

На сегодняшний день известно много способов формирования теплозащитных покрытий – это и плакирование днища многослойными пластинами [4], и использование специальных вставок, и формирование керамических покрытий различными способами [5]. Наиболее приемлемыми материалами для таких покрытий являются окись алюминия и двуокись циркония [6]. Однако у всех покрытий такого рода возникают проблемы, связанные с их разрушением и отслоением в результате воздействия высокочастотных температурных нагрузок. В настоящий момент большой интерес в мире вызывает создание теплозащитных покрытий на поршнях ДВС при помощи технологии микродугового оксидирования (МДО).

МДО является перспективным методом формирования теплозащитного слоя на днище поршня. Суть метода заключается в образовании на поверхности детали под воздействием микродуговых разрядов высокопрочного керамического слоя (МДО-слоя), состоящего преимущественно из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунда) и других окислов алюминия. Метод позволяет получать покрытия толщиной до 400 мкм, обладающих высокой микротвердостью – 5...24 ГПа [7-9]. При этом МДО-слои имеют хорошую адгезию к подложке даже в условиях значительных термоциклических нагрузок [10].

Однако в теории и практике двигателестроения недостаточно разработаны научно-технические основы снижения теплонапряженности поршней из алюминиевых сплавов путем нанесения на днище теплозащитных оксидных слоев методом МДО. Известны работы [11-16], в которых исследовалось влияние МДО-слоя на тепловое состояние поршня и на эксплуатационные показатели двигателя. В работе [13] проведены теоретические исследования, которые показали, что существует рациональная толщина МДО-слоя для тепловой изоляции днища поршня (для дизеля 120-160 мкм), которая позволяет уменьшить удельный тепловой поток через поршень на 15 %, а также снизить температуру на внутренней стороне поршня на 6,5 %, при этом максимальное значение размаха температурной волны увеличивается на 60 °С. Теплозащитные свойства МДО-слоя также исследовались в работе [14], результаты, полученные на специальной установке, показали, что МДО-слои толщиной 25-30 мкм, сформированные на днище и канавках, позволяют снизить температуру с внутренней стороны поршня на 23,9 % (на 33

°С в точке под центром днища поршня). При этом расчетные данные, приведенные в работе [16] позволяют утверждать, что МДО-слой толщиной всего 8 мкм способен снизить температуру поршня на 25 %.

Очевидно, что информация по эффективности тепловой защиты поршней ДВС методом МДО, имеющаяся на настоящий момент в научной литературе, в целом противоречива и недостаточна. Данная работа направлена на ликвидацию этого пробела.

Целью работы является экспериментальное исследование теплозащитной способности МДО-слоя, сформированного на днище поршня, в режиме моделирования тепловых процессов реального двигателя.

1. Методы исследования

Работа проводилась на специально спроектированном и изготовленном безмоторном стенде (рис. 1), предназначенном для исследования теплового состояния поршня двухтактного двигателя АПД-800. Безмоторный стенд включает в себя корпус с установленной в него гильзой цилиндра, исследуемый поршень и источник направленного пламени с факельной структурой – газовую горелку с баллоном изобутана. В корпусе имеется рубашка водяного охлаждения. Циркуляция воды обеспечивается за счет насоса, соединенного через патрубки с рубашкой охлаждения корпуса.



Рис. 1. Испытательный безмоторный стенд

При помощи газовой горелки в надпоршневом пространстве создавалась температура 780...800 °С (рис. 2). Такое значение температуры было получено при помощи расчетов, проведенных на основе рабочих характеристик реального двигателя.

Начальная температура воды в системе охлаждения устанавливалась $44 \pm 0,5$ °С и повышалась в ходе эксперимента до соответствующей режиму работы реального двигателя – 50 ± 3 °С.

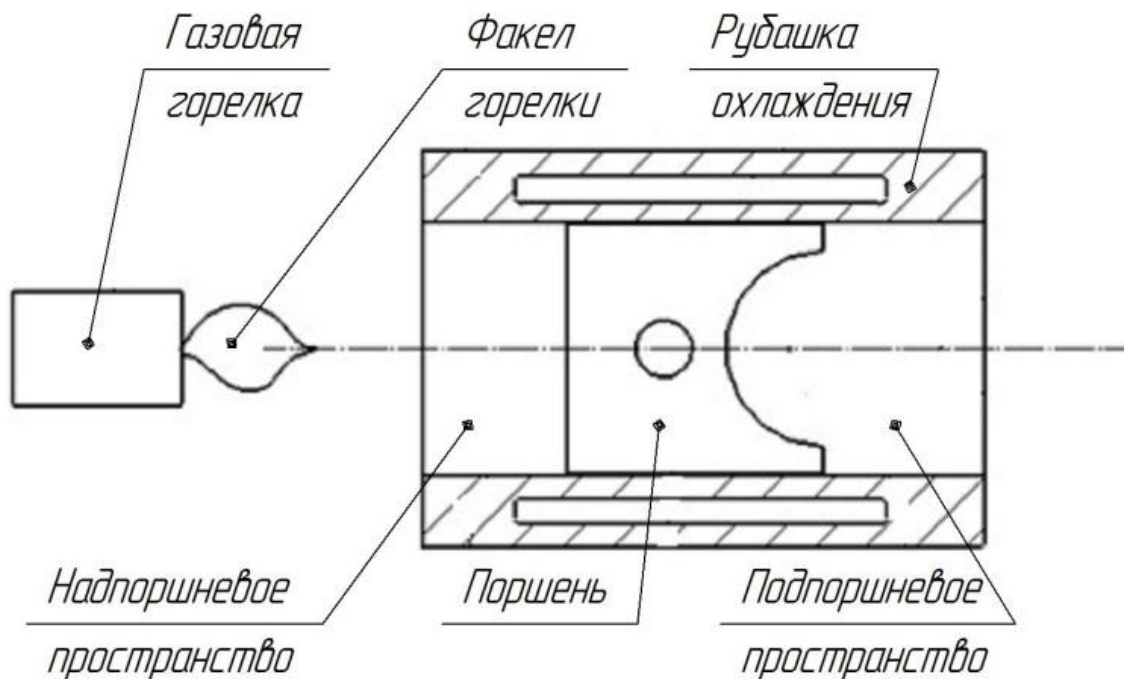


Рис. 2. Схема нагрева поршня на безмоторном стенде

Исследованию подвергались опытный образец штатного поршня двигателя АПД-800, изготовленный из алюминиевого сплава АК12Д ОСТ 192014-90 (рис. 3а), и аналогичный образец поршня из того же сплава с теплозащитным слоем, сформированным на днище методом МДО (рис. 3б). Для проведения испытаний была выбрана толщина МДО-слоя на днище поршня ~ 100 мкм. Выбор обусловлен тем, что эта толщина, по мнению авторов, должна быть достаточна для получения ощутимого теплозащитного эффекта и при этом обеспечит хорошую адгезию покрытия к подложке.

Процесс нанесения МДО проводился в течение 1,5 часов в щелочном электролите, который был приготовлен на основе дистиллированной воды с добавлением компонентов следующего состава: 2,5 г/л КОН и 2,5 г/л Na_2SiO_3 . Толщина МДО-слоя определялась при помощи вихретокового толщиномера ТТ-220 и составила 137 ± 14 мкм. После нанесения МДО-слоя поршень промывался проточной водой и механическим способом с поверхности удалялся муллит на глубину 15...20 мкм. Окончательная толщина МДО-слоя на днище поршня составила 106 ± 8 мкм (рис. 3б).



a



б

Рис. 3. Поршень двигателя АПД-800: *a* – без теплозащитного покрытия; *б* – с МДО-покрытием

Сначала испытаниям подвергался поршень без МДО-слоя, для чего он устанавливался в гильзу безмоторного стенда и подвергался нагреву. В ходе испытаний пошагово через каждые 3 минуты в течение 30 минут фиксировалось распределение тепловых полей на днище внутри поршня с помощью тепловизора *FLIRP 660*, который позволяет проводить измерения температуры в диапазоне от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разрешающей способностью до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью записи $15\ldots 25$ кадров/с. Температура воды измерялась инфракрасным термометром *CENTER 350*. Температура пламени определялась измерителем ТРМ-200, к которому была подключена термопара типа ХА, жестко зафиксированная в надпоршневом пространстве на расстоянии 10 мм от поверхности поршня, над центром днища. Аналогичным образом проводились испытания поршня с МДО-слоем.

2. Результаты эксперимента

В результате проведенных исследований были получены данные, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний поршней без покрытия и с МДО-слоем

Время эксперимента	Показание термопары в пламени		Максимальная температура днища внутри поршня		Температура охлаждающей воды	
Т, мин	$t_p, ^{\circ}\text{C}$		$t_{п. \max}, ^{\circ}\text{C}$		$t_w, ^{\circ}\text{C}$	
	штатный поршень	поршень с МДО-слоем	штатный поршень	поршень с МДО-слоем	штатный поршень	поршень с МДО-слоем
0	800	800	125	107	43,5	44,5
3	794	793	167	154	44,5	45,0
6	806	790	165	147	46,5	45,0
9	805	791	160	144	48,0	46,5
12	798	791	155	141	49,0	47,5
15	802	790	153	139	49,5	46,0
18	795	788	149	136	49,5	48,5
21	794	784	146	135	49,5	49,0
24	792	782	144	134	50,0	48,0
27	789	782	142	134	49,5	49,5
30	786	781	139	134	50,0	48,5

Инфракрасные снимки с температурными показателями со стороны подпоршневого пространства для днища поршня без покрытия и с теплозащитным МДО-слоем через 3 минуты после начала нагрева представлены на рис. 4.

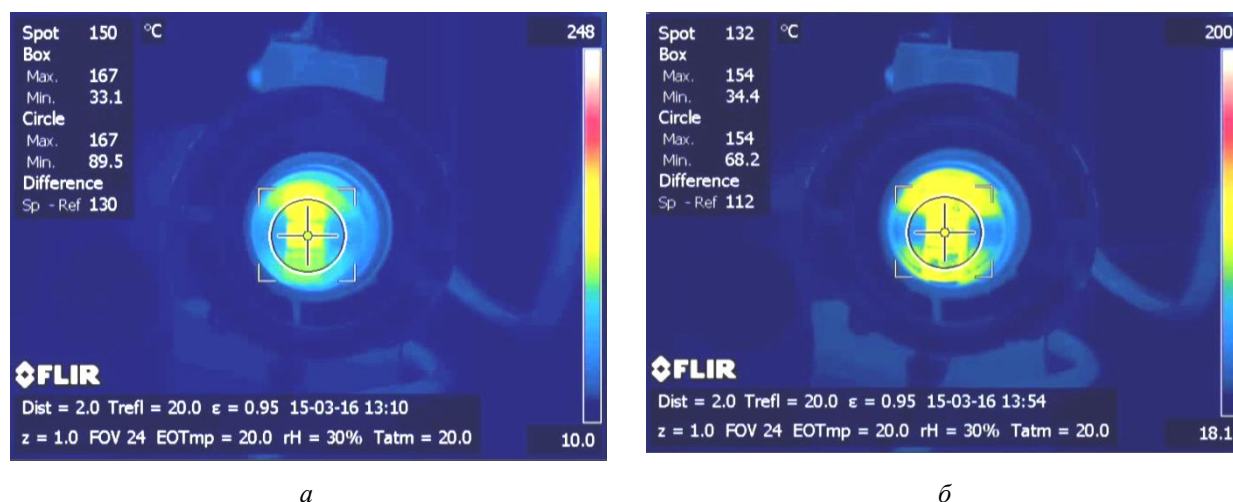


Рис. 4. Инфракрасный снимок с температурными показателями после трех минут нагрева днища поршня: *а* – без покрытия; *б* – с МДО-слоем

На рис. 5 показано изменение максимальной температуры поверхности поршня, наблюдаемой тепловизором в процессе эксперимента.

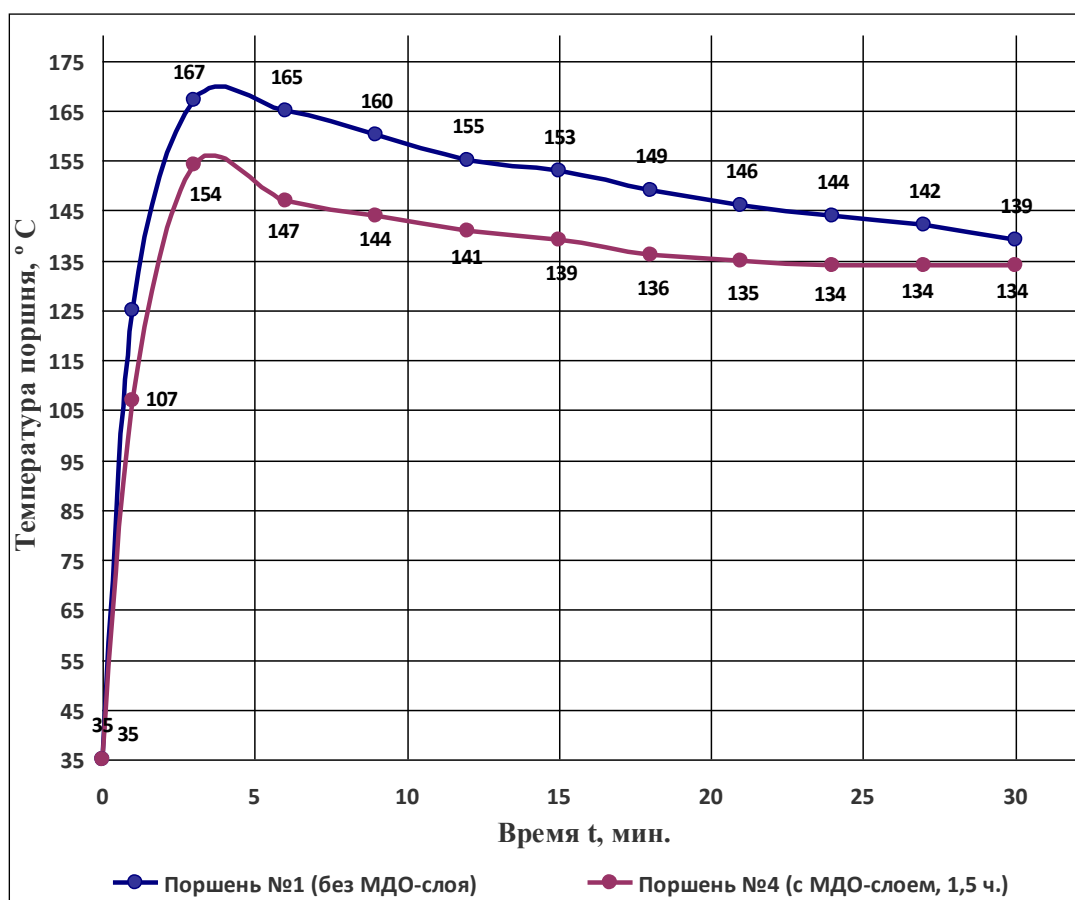


Рис. 5. Максимальная температура поршня со стороны подпоршневого пространства

При анализе полученных результатов было выявлено, что максимальная температура днища поршня с теплозащитным МДО-слоем в процессе испытаний достигала 154 °С (рис. 4б), при этом максимальная температура поршня без МДО-слоя достигала 167 °С (рис. 4а). В целом, в процессе испытаний, зафиксировано снижение температуры поршня со стороны подпоршневого пространства по сравнению с температурой днища штатного поршня на 3,6-14,4 % (в среднем на 8,5 %). При этом отклонение температуры в надпоршневом пространстве в ходе экспериментов составило от 0 до 1,9 %. Наблюдаемый эффект более выражен в области повышенных температур, что актуально для форсированных двигателей.

Заключение

Результаты проведенного на безмоторном стенде исследования показывают, что применение теплозащитного МДО-покрытия на днище поршня является эффективным способом снижения его теплонапряженности, особенно при повышенной тепловой нагрузке двигателя.

Результаты работы были получены в ходе выполнения совместного проекта ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО УГАТУ «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью», реализуемого по Договору №40/10-30976/НЧ-НЧ-01-13-ХГ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0010 м/у ОАО «УМПО» и Министерством образования и науки РФ) в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 года.

Список литературы

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. Вырубов Д.Н., Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Круглов М.Г., Леонов О.Б., Орлин А.С., Роганов С.Г., Симаков Ф.Ф., Чайнов Н.Д., Чистяков В.К. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей: учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 384 с.

4. 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.
5. 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.
6. Сибриков Д.А. Снижение теплонапряженности поршневых групп судовых дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 18 с.
7. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое окислирование: теория, технология, оборудование. М.: Экомет, 2005. 368 с.
8. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 122, iss. 2-3. P. 73-93.
9. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л.: Химия, 1991. 128 с.
10. Dudareva N. Yu., Butusov I.A., Kalschikov R.V., Grin R.R., Alexandrov I.V., Musin F.F. The Investigation of the Effect of Micro-Arc Oxidation Modes on the Adhesion Strength of Coatings (Conference Article) // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, iss. 5. Special Issue on Simulation of Manufacturing Technologies. P. 5-8.
11. Шпаковский В.В., Линьков О.Ю. Анализ эффективности применения поршней с корундовым слоем для снижения расхода топлива // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 10 (57). С. 140-144.
12. 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.
13. Шпаковский В.В. Влияние частично-динамической теплоизоляции на температурное состояние поверхности поршня // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 92-95.
14. Марьин Д.М., Хохлов А.Л., Шлущенко А.А., Уханов Д.А. Влияние окислированного слоя на теплонапряженность поршня двигателя внутреннего сгорания // Scienceandworld. 2014. № 1(5). С. 108-109.
15. Шпаковский В.В., Осейчук В.В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля теплового ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндропоршневой группы // Двигатели внутреннего сгорания. 2007. № 2. С. 101-105.
16. Степанов В.А. Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым окислированием днищ поршней: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 21 с.

Experimentally Studied Thermal Piston-head State of the Internal-Combustion Engine with a Thermal Layer Formed by Micro-Arc Oxidation Method

N.Yu. Dudareva¹, R.V. Kal'shchikov¹,
O.P. Dombrovskii¹, I.A. Butusov^{1,*}

[*butusv.ilya@mail.ru](mailto:butusv.ilya@mail.ru)

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Keywords: microarc oxidation, piston, thermal tension, thermal barrier layer, non-motorized stand

The paper presents results of experimental study to show the efficiency of reducing thermal tension of internal combustion engine (ICE) pistons through forming a thermal barrier coating on the piston-head. During the engine operation the piston is under the most thermal stress. High temperatures in the combustion chamber may lead to the piston-head burnout and destruction and engine failure.

Micro-arc oxidation (MAO) method was selected as the technology to create a thermal barrier coating. MAO technology allows us to form the ceramic coating with a thickness of 400 μm on the surface of aluminum alloy, which have high heat resistance, and have good adhesion to the substrate even under thermal cycling stresses.

Deliverables of MAO method used to protect pistons described in the scientific literature are insufficient, as they are either calculated or experimentally obtained at the special plants (units), which do not reproduce piston operation in a real engine. This work aims to fill this gap. The aim of the work is an experimental study of the thermal protective ability of MAO-layer formed on the piston-head with simulation of thermal processes of the real engine.

The tests were performed on a specially designed and manufactured stand free of motor, which reproduces operation conditions maximum close to those of the real engine. The piston is heated by a fire source - gas burner with isobutene balloon, cooling is carried out by the water circulation system through the water-cooling jacket.

Tests have been conducted to compare the thermal state of the regular engine piston without thermal protection and the piston with a heat layer formed on the piston-head by MAO method. The study findings show that the thermal protective MAO-layer with thickness of ~100 μm allows us to reduce thermal tension of piston on average by 8,5 %. Thus at high temperatures there is the most pronounced effect that is important for the uprated engines.

The obtained findings can be used when designing and manufacturing the ICE with aluminum-alloy pistons.

References

1. Vyrubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I., Kruglov M.G., Leonov O.B., Mednov A.A., Mizernyuk G.N., Orlin A.S., Roganov S.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigatelei* [Internal combustion engines: The theory of piston and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 372 p. (in Russian).
2. Bugaev V.P. *Ekspluatatsiya i remont forsirovannykh traktornykh dvigatelei* [Maintenance and repair of tractor uprated engines]. Moscow, Kolos Publ., 1981. 209 p. (in Russian).
3. Vyrubov D.N., Efimov S.I., Ivashchenko N.A., Kruglov M.G., Leonov O.B., Orlin A.S., Roganov S.G., Simakov F.F., Chainov N.D., Chistyakov V.K. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Konstruirovaniye i raschet na prochnost' porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines: Design and strength calculation of piston and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 384 p. (in Russian).
4. Sergeev A.V., Kazakov N.F., Smirnova T.N., Boldyrev I.V. *Sposob teplovoi zashchity dnishcha porshnya* [Method of thermal protection of piston bottom]. Patent USSR, no. 585034, 1977. (in Russian).
5. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Kadyrov S.M., Aripdzhanov M.M. Computational and Experimental Study of Influence of Piston's and Sleeve's Thermal Insulation on Formation of Nitrogen Oxides in Combustion Products of High-Speed Diesel. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 4, pp. 83-102. (in Russian).
6. Sibrikov D.A. *Snizhenie teplotnapryazhennosti porshnevykh grupp sudovykh dizelei. Avtoref. kand.diss.* [Reducing of thermal stress of piston marine diesel engines. Abstract of cand. diss.]. Novosibirsk, 2004. 18 p. (in Russian).
7. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V., Lyudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. *Mikrodugovoe oksidirovaniye : teoriya, tekhnologiya, oborudovaniye* [Microarc oxidation: theory, technology, equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005. 368 p. (in Russian).
8. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, iss. 2-3, pp. 73-93.
9. Chernenko V.I., Snezhko L.A., Papanova I.I. *Poluchenie pokrytii anodno-iskrovym elektrolizom* [Coatings by anodic spark electrolysis]. Leningrad, Khimiya Publ., 1991. 128 p. (in Russian).
10. Dudareva N. Yu., Butusov I.A., Kalschikov R.V., Grin R.R., Alexandrov I.V., Musin F.F. The Investigation of the Effect of Micro-Arc Oxidation Modes on the Adhesion Strength of Coatings (Conference Article). *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2014, vol. 7, iss. 5. Special Issue on Simulation of Manufacturing Technologies, pp. 5-8.

11. Shpakovskii V.V., Lin'kov O.Yu. Analysis of the effectiveness of the use of pistons with corundum layer to reduce fuel consumption. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 140-144. (in Russian).
12. Marchenko A.P., Shpakovsky V.V. Corundum layer influence on working surfaces of pistons on process of combustion in ICE. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya = Internal Combustion Engines*, 2011, no. 2, pp. 24-28. (in Russian).
13. Shpakovsky V.V. Influence of an in part - dynamic heat insulation on a temperature condition of the piston's surface. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya = Internal Combustion Engines*, 2010, no. 2, pp. 92-95. (in Russian).
14. Mar'in D.M., Khokhlov A.L., Shlushchenko A.A., Ukhanov D.A. Influence of oxidized layer on thermal stress of internal combustion engine pistons. *Scienceandworld*, 2014, no. 1 (5), pp. 108-109. (in Russian).
15. Shpakovsky V.V., Osejchuk V.V. The influence of corundum surface of diesel engines pistons of diesel locomotive ChME – 3 on cylinder and piston groups characteristics. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya = Internal Combustion Engines*, 2007, no. 2, pp. 101-105. (in Russian).
16. Stepanov V.A. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei avtomobilei mikrodogovym oksidirovaniem dnishch porshnei. Avtoreferat kand. diss.* [Improving of operational indicators of cars with the use of microarc oxidation of piston bottom. Abstract of cand. diss.]. Penza, 2014. 21 p. (in Russian).