

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629>

Оригинальное исследование



Эффективность тепловой защиты поршней ДВС покрытием, сформированным микродуговым оксидированием

Н.Ю. Дударева¹, А.В. Коломейченко², Ю.Е. Кисель³¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация;² Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Российская Федерация;³ Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для защиты поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) от прогара и повышения их долговечности целесообразно использовать керамические покрытия, формируемые на днище поршня микродуговым оксидированием (МДО). Исследованию эффективности такого покрытия посвящено много работ. Однако, большинство подобных исследований проведены на лабораторных установках, имитирующих работу двигателя, и обычно не учитывают реальные теплофизические параметры МДО-покрытия. Поэтому оценить эффективность тепловой защиты такого покрытия довольно сложно.

Цель работы — исследование методом численного моделирования эффективности тепловой защиты поршней посредством керамического покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования на поверхности днища поршня.

Методы. Исследование проводилось в программе SolidWorks Simulation. В качестве материала поршня использовались два поршневых алюминиевых сплава: АК12д (с содержанием кремния 12%) и АК4-1 (с содержанием кремния 0,35%). К поверхностям образцового поршня прикладывались температурные нагрузки, соответствующие работе реального двигателя. На первом этапе моделировалось тепловое состояние поршней из разных сплавов без МДО-покрытия. На втором и третьем этапах исследовалось влияние толщины керамического покрытия, сформированного на днище поршня, на его тепловое состояние. На втором этапе материалом поршня являлся сплав АК4-1, а на третьем этапе — сплав АК12д. В качестве материала покрытия использовалась керамика, свойства которой соответствовали свойствам покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования на рассматриваемых сплавах. Толщина покрытия изменялась с шагом 100 мкм в диапазоне от 50 до 350 мкм. Температура определялась методом зондирования в различных областях поршня: на поверхности днища на МДО-покрытии и под ним, в области поршневых канавок, на юбке поршня и на поверхности днища поршня со стороны картера.

Результаты. Моделированием установлено:

1. Покрытие днища поршня микродуговым оксидированием снижает тепловую напряженность поршня не зависимо от химического состава алюминиевого сплава.
2. Эффективность теплозащиты поршня повышается при увеличении толщины керамического покрытия и при уменьшении его коэффициента теплопроводности.
3. Наибольший теплозащитный эффект достигается у поршня из эвтектического сплава АД12д.

Заключение. Установлено, что МДО-покрытие на днище поршня является эффективным способом снижения тепловой напряженности поршней ДВС. Повышение толщины керамического покрытия и снижение его коэффициента теплопроводности ведет к увеличению эффективности тепловой защиты поршней. Снижение коэффициента теплопроводности МДО-покрытия и увеличение его толщины также приводит к росту температуры на поверхности керамического покрытия, нанесенного на днище поршня.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; тепловая защита; керамическое покрытие (МДО-покрытие); поршень; микродуговое оксидирование.

Как цитировать:

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>

Рукопись получена: 21.09.2023

Рукопись одобрена: 20.01.2024

Опубликована онлайн: 15.03.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629>

Original Study Article

The efficiency of thermal protection of ICE pistons with the micro-arc oxidation

Natalia Yu. Dudareva¹, Alexander V. Kolomeichenko², Yury E. Kisel³

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;

² Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute «NAMI», Moscow, Russian Federation;

³ Bryansk State Engineering Technological University, Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In order to protect pistons of internal combustion engines (ICE) from burnout and increase their durability, it is reasonable to use ceramic coatings formed on the piston head with micro-arc oxidation (MAO). Many scientific papers have been devoted to the study of the efficiency of these coatings. However, most of these studies were carried out at laboratory facilities simulating the engine operation, generally, not taking into account the real thermophysical parameters of the MAO coating. Therefore, the thermal protection efficiency of these coatings is difficult to assess.

AIM: Study of efficiency of the thermal protection of pistons using a ceramic coating formed by micro-arc oxidation on the piston head with numerical simulation.

METHODS: The study was conducted in the SolidWorks Simulation software. Two piston aluminum alloys were used as the piston material: AK12d (with a silicon content of 12%) and AK4-1 (with a silicon content of 0.35%). Temperature loads corresponding to the operation of a real engine were applied to the surfaces of the model piston. At the first stage of the study, the thermal state of pistons made of different uncoated alloys was simulated. At the second and third stages of the study, the effect of the coating thickness on the piston thermal state was simulated. The piston material of the second study stage was the AK4-1 alloy. The piston material of the third study stage was the AK12d alloy. Ceramics, which properties correspond to the coatings properties formed with the micro-arc oxidation method on these alloys, were used as the coating material. The coating thickness varied in the range from 50 to 350 μm in increments of 100 μm . The probing method was used to determine the temperature in various areas of the piston, such as at the piston head surface at the MAO coating and under it, in the area of piston grooves, at a piston skirt and the piston head from the side of a crankcase.

RESULTS: With the simulation, it was found that:

1. The micro-arc coating of the piston head reduces the thermal tension of the piston regardless of the aluminum alloy chemical composition.
2. The efficiency of the piston's thermal protection increases with an increase in the ceramic coating thickness and a decrease in its thermal conductivity coefficient.
3. The greatest heat-protecting effect is achieved by the piston made of the AK12d eutectic alloy.

CONCLUSIONS: It is found that the MAO coating at the piston head is an effective way to reduce the thermal tension of the ICE pistons. Increasing the ceramic coating thickness and a decrease in its thermal conductivity coefficient increases the efficiency of the pistons thermal protection. Reducing the thermal conductivity of the MAO coating and increasing the MAO coating thickness increases the temperature on the coating surface.

Keywords: Internal combustion engines; thermal protection; ceramic coating; piston; micro-arc oxidation.

To cite this article:

Dudareva NYu, Kolomeichenko AV, Kisel YuE. The efficiency of thermal protection of ICE pistons with the micro-arc oxidation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):101–112. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-586629>

Received: 21.09.2023

Accepted: 20.01.2024

Published online: 15.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Сильно нагруженными деталями двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются их поршни. Днища поршней в процессе работы двигателя воспринимают высокое давление (до 8 МПа), соприкасаются с газами, образующимися при сгорании топлива, температура которых составляет $\sim 2500^\circ\text{C}$ и нагреваются до $350\text{--}450^\circ\text{C}$ [1, 2]. Такие температурные и механические нагрузки являются циклическими и могут привести к разрушению поршня и поломке ДВС из-за прогара поршней в донной их части [3, 4]. По этой причине выбор материала для поршня является ключевым фактором, обеспечивающим надежную и долговечную работу не только этой детали, но и всего двигателя. При производстве поршней обычно применяются алюминиевые сплавы, которые не обладают высокой теплостойкостью, что увеличивает вероятность появления прогара [5].

Для предотвращения возникновения прогара используют различные способы: 1) отказ от алюминиевых сплавов и изготовление поршней из сталей, чугунов или композитных материалов; 3) использование специальных теплоизолирующих накладок и вставок для днища; 2) нанесение на поверхности поршней специальных теплоизоляционных покрытий, состоящих преимущественно из оксидов типа ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO , BeO или сложнокомпонентных покрытий типа NiCrAl [6–8]. Однако, такие решения не всегда являются оптимальными в силу разных причин [9].

В настоящее время наиболее перспективной и активно развивающейся технологией, позволяющей формировать теплозащитные керамические покрытия на деталях из алюминиевых сплавов является микродуговое оксидирование (МДО) [10, 11]. Такие керамические покрытия обладают толщиной до $300\text{--}400$ мкм, состоят преимущественно из оксидов алюминия, отличаются высокой адгезией к материалу основы даже в условиях значительных термоциклических нагрузок, имеют хорошую коррозионную стойкость, высокую микротвёрдость (до 22 ГПа) [12] и низкий коэффициент теплопроводности $\sim 0,5\text{--}5$ Вт/(м·К) [13, 14]. Отличительной особенностью МДО-покрытий является то, что их коэффициент теплопроводности зависит от материала подложки. Например, на алюминиевых сплавах с малым количеством кремния в химическом составе (типа АК4-1) коэффициент теплопроводности МДО-покрытия $\sim 4,5\text{--}5,0$ Вт/(м·К) [15], а на сплавах с высоким содержанием кремния (от 12% и выше) коэффициент теплопроводности МДО-покрытия составляет $1,0\text{--}1,5$ Вт/(м·К) [16].

На настоящий момент МДО-покрытия уже применяются для тепловой защиты поршней. В работе [17] показано, что при нанесении покрытия толщиной всего $25\text{--}30$ мкм на днище поршня и поршневые канавки отмечается снижение температуры на 33°C (на 23,9%) на поверхности днища поршня со стороны картера. В других

исследованиях отмечается, что МДО-покрытие толщиной $25\text{--}30$ мкм снижает тепловое воздействие на поршень только на 15 % [18]. Исследования, проведенные на дизельных ДВС, показали, что МДО-покрытие толщиной $120\text{--}160$ мкм снижает температуру поршня на $6,5^\circ\text{C}$ [19].

Очевидно, что имеющаяся научно-техническая информация является несистематизированной и недостаточной по глубине и объему. Изложенные сведения позволяют лишь сделать вывод, что МДО-покрытия могут использоваться для тепловой защиты поршня, но не позволяют оценить эффективность этих покрытий. Такая ситуация обусловлена несколькими причинами. Во-первых, при проведении исследований не принимался во внимание тот факт, что теплофизические свойства МДО-покрытий (удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности) во многом зависят от химического состава алюминиевого сплава, из которого изготавливается поршень [14–16]. В таких исследованиях обычно используется справочное значение коэффициента теплопроводности алюминиевой керамики, которое значительно отличается от коэффициентов теплопроводности МДО-покрытий [13, 20]. Во-вторых, техническая и методическая сложность организации теплофизических измерений на поршне работающего двигателя, способствовала тому, что многие из экспериментальных данных были получены на безмоторных стендах или на лабораторных установках, условия работы которых отличаются от работы реальных ДВС. В-третьих, многие из указанных в работах опытные данные были получены на поршнях с разной толщиной МДО-покрытия. А толщина керамического покрытия, как и любого теплозащитного слоя, оказывает существенное влияние на эффективность тепловой защиты детали.

Современным подходом, который позволит исследовать влияние МДО-покрытия на тепловое состояние поршня, и при этом учесть его сложную геометрическую форму, свойства материала, а также толщину и теплофизические свойства МДО-покрытия, является численное моделирование с применением современных прикладных программ [21, 22]. Исходя из этого, была сформулирована цель данной работы.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является исследование методом численного моделирования эффективности тепловой защиты поршней посредством керамического покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования на поверхности днища поршня.

МЕТОДЫ И ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на 3D-модели поршня методом численного моделирования в программе SolidWorks 2018 с использованием приложения SolidWorks Simulation. Указанные программы позволяют проводить тепловые

расчеты деталей с учетом температурных нагрузок различного вида [21, 22].

Исследования проводились в три этапа. На первом этапе моделировалось тепловое состояние поршней без керамического покрытия. Этот эксперимент позволил определить влияние свойств материала поршня на его тепловое состояние. В качестве материалов задавались два деформируемых алюминиевых сплава с различным количеством кремния в химическом составе в соответствии с ГОСТ 4784-2019: доэвтектический алюминиевый сплав АК4-1 с содержанием кремния Si 0,35% (по массе) и эвтектический сплав АК12д с содержанием кремния Si 11–13%.

На втором этапе был проведен эксперимент по определению влияния толщины МДО-покрытия, сформированного на днище поршня, на его тепловое состояние. В качестве материала поршня был выбран сплав АК4-1. Было проведено 4 расчета, с разной толщиной керамического покрытия.

Третий этап был аналогичен второму, только в качестве материала поршня был выбран сплав АК12д. На этом этапе также проведено 4 расчета для разной толщины керамического покрытия. Температурные нагрузки,

прикладываемые к поверхностям поршня, задавались граничными условиями: температурой и коэффициентом теплоотдачи газов.

Для всех этапов моделирования граничные условия были одинаковые.

КРИТЕРИИ СООТВЕТСТВИЯ

Для проведения исследований использовалась 3D-модель поршня, выполненная в программе SolidWorks (см. рис. 1а). Поршень имеет диаметр 76 мм. Днище у поршня сферическое, выпуклое, с радиусом кривизны 322 мм. Данный поршень был выбран в качестве модели в связи с тем, что ранее, в системе имитационного моделирования «Альбея» был определен комплекс температурных нагрузок, воздействующих на поверхности этого поршня, и рассчитаны коэффициенты конвективной теплоотдачи [23, 24].

Схема приложения основных нагрузок на базовые поверхности поршня представлена на рис. 2а, а на поверхности в области поршневых канавок — на рис. 2б.

Значения граничных условий приведены в таблице 1.

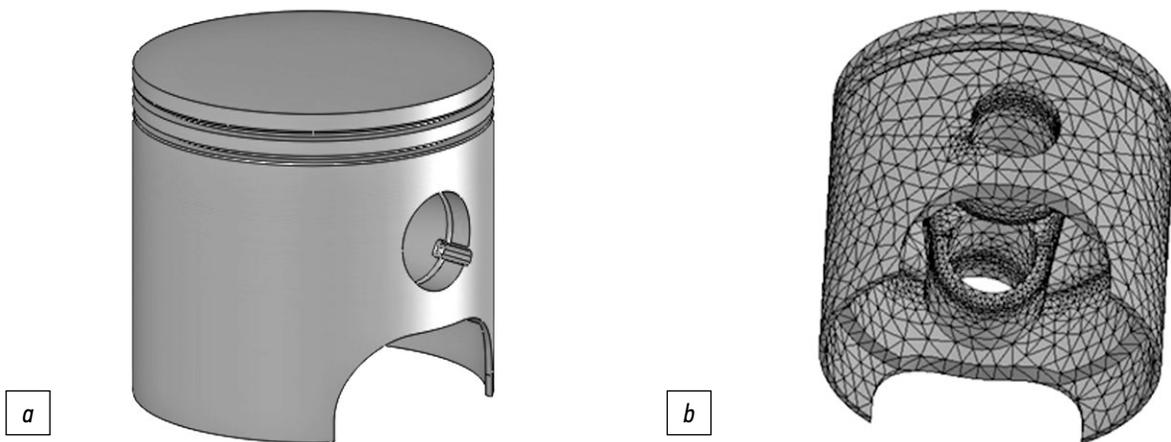


Рис. 1. Модель поршня двигателя: *a* — 3D-модель в SolidWorks; *b* — модель с сеткой.

Fig. 1. The engine piston assembly model: *a* — the SolidWorks 3D-model; *b* — the meshed model.

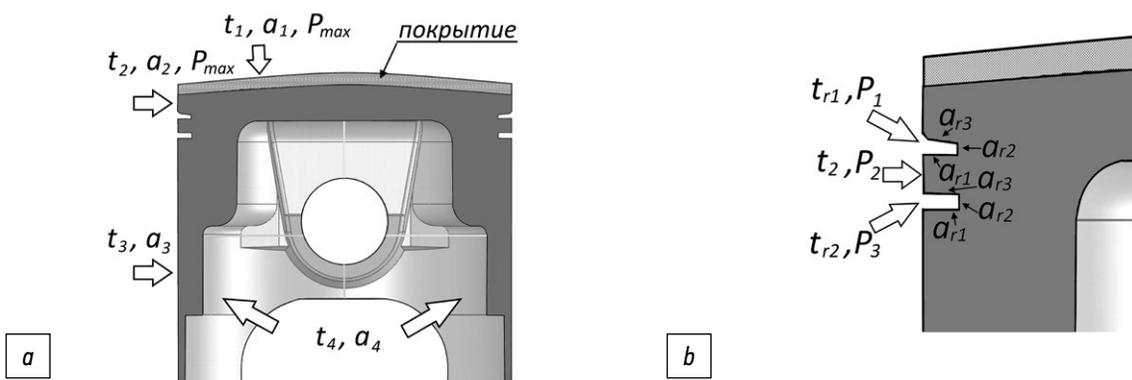


Рис. 2. Схема температурных и механических нагрузок: *a* — на основных поверхностях поршня; *b* — на поверхностях поршневых канавок.

Fig. 2. Diagram of temperature and mechanical loads: *a* — at the main piston surfaces; *b* — at the piston grooves surface.

Таблица 1. Граничные условия**Table 1.** Boundary conditions

Коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)		Температура, К	
Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
a1	592	t1	1413
a2	148	t2	1413
a3	1485	t3	473
a4	174	t4	363
ar1	11609	tr2	423
ar2	97	tr1	573
ar3	1818		

Выбор материалов для проведения моделирования был обусловлен следующими фактами. Во-первых, основная доля современных поршней изготавливаются из эвтектических алюминиевых сплавов, типа АЛ30, АК12, АК12д. Все эти сплавы в своем составе содержат 11–13% кремния, который, как основной легирующий элемент, определяет физико-механические свойства сплава. В качестве материала для исследования был выбран сплав АК12д, который является эвтектическим деформируемым сплавом. Алюминиевый сплав АК4-1 также является поршневым деформируемым алюминиевым сплавом. По своему составу этот сплав близок к дюралюминию и получил широкое распространение во всем мире благодаря высокой жаропрочности [25]. Во-вторых, для МДО-покрытий, полученных на этих сплавах, были ранее определены теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость) [15, 16], что позволило провести исследование, используя актуальные значения теплофизических свойств не только для алюминиевых сплавов, но и для МДО-покрытий.

Расчеты первого этапа проводились на 3D-модели поршня, а расчеты второго и третьего этапов проводились на многослойных конструкциях, представляющих собой 3D-сборку поршня и керамического покрытия. Модель керамического покрытия представляла собой тонкую пленку, которая копирует поверхность днища поршня по форме и размерам. Расчеты выполнялись для МДО-покрытия разной толщины: 50 мкм, 150 мкм, 250 мкм и 350 мкм. Выбор обосновывался технологическими возможностями МДО: данная технология не позволяет формировать керамические покрытия толщиной более 350–400 мкм [12, 13].

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ

Приложение температурных нагрузок учитывало тот факт, что температурное поле поршня в течение рабочего цикла ДВС меняется незначительно и может считаться стационарным. Поэтому локальные значения

температуры газов и коэффициентов теплоотдачи были заменены на средние постоянные значения температур и коэффициентов теплоотдачи. Такой подход обычно применяется при проведении термического моделирования деталей ДВС [24, 26, 27].

ПРОВЕДЕННЫЕ В РАМКАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕДУРЫ

Перед проведением моделирования задавались материалы поршня и МДО-покрытия. В связи с тем, что в библиотеке SolidWorks содержатся не все материалы, но имеется возможность создавать новые материалы и менять их свойства, то для поршня был выбран материал, задаваемый пользователем, на базе алюминиевого сплава, свойства которого корректировались в соответствии со сплавами, используемыми в исследовании: АК4-1 или АК12д. Для МДО-покрытия выбирался материал — керамика, базовые свойства которой также корректировались в соответствии со справочными данными [28]. Теплофизические параметры МДО-покрытий были предварительно рассчитаны по формулам, представленным в работах [15, 16] с учетом сплава поршня. Характеристики алюминиевых сплавов и МДО-покрытий, сформированных на этих сплавах и использованные при моделировании, представлены в табл. 2. При моделировании использовались характеристики МДО-покрытий и алюминиевых сплавов, соответствующие нагретому поршню до температуры 350°C.

В связи с тем, что расчеты поршня с МДО-покрытием выполнялись в сборках, состоящих из моделей «поршня» и «покрытия», то для получения наиболее точных результатов требовалось обеспечить совпадение узлов у сеток конечных элементов на сопрягаемых моделях [29]. Для этого при создании сборки между «поршнем» и «покрытием» задавались следующие сопряжения: для сферических граней — «совпадение», а для цилиндрических кромок поршня и покрытия — «концентричность». Далее к 3D-модели поршня прикладывались температурные нагрузки (рис. 2, табл. 1).

Таблица 2. Свойства материалов поршня (алюминиевых сплавов АК4-1 и АК12д) и МДО-покрытий [15, 16, 28]**Table 2.** Properties of piston materials (the АК4-1 and АК12d aluminum alloys) and MAO coatings [15, 16, 28]

Характеристики	Значения			
	для АК4-1		для АК12д	
	алюминиевый сплав	МДО-покрытие	алюминиевый сплав	МДО-покрытие
Плотность, ρ , кг/м ³	2800	3128	2680	2720
Предел текучести σ_T , МПа				
– при 20 °С	310–330	–	190–230	–
– при 350 °С	30–50	–	20–30	–
Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа				
– при 20 °С	380–400	172	200–250	172
– при 350 °С	30–50	172	35–55	172
Модуль упругости, E , ГПа	72	220	80	220
Коэффициент Пуассона, μ	0,33	0,22	0,33	0,22
Модуль сдвига, G , ГПа	27	90	27	90
Коэффициент теплового расширения, α , 10 ⁻⁶ 1/К				
– при 20 °С	20,6	4,7	20,6	4,7
– при 350 °С	23,4	5,2	23,4	5,2
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К)				
– при 20 °С	144	5,1	162	1,5
– при 350 °С	175	4,4	165	1,6
Теплоемкость, C_p , Дж/(кг·К)				
– при 20 °С	863	803	818	851
– при 350 °С	1053	1232	970	1032

После задания материалов на моделях строилась сетка конечных элементов. Задавалось «высокое» качество сетки и строилась она с учетом смешанной кривизны поверхностей (рис. 1b). При такой сетке конечные элементы имели минимальный размер — 1,01 мм, максимальный размер элемента — 5,08 мм, а минимальная толщина элемента соответствовала толщине МДО-покрытия. Количество конечных элементов в моделях составило — 38406, а количество узлов — 62112.

После создания сетки конечных элементов проводился расчет теплового состояния поршня. Затем определялась температура поршня в конкретных точках, схема расположения которых представлена на рис. 3.

ОСНОВНОЙ ИСХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведения моделирования на 2 и 3 этапах были получены значения температур на поверхности покрытия поршня (T_1 – T_3). Также были определены температуры в точках на поверхности днища поршня (T_4 – T_6), которые для 2-го и 3-го этапов моделирования находились под МДО-покрытием. Определялась также температура

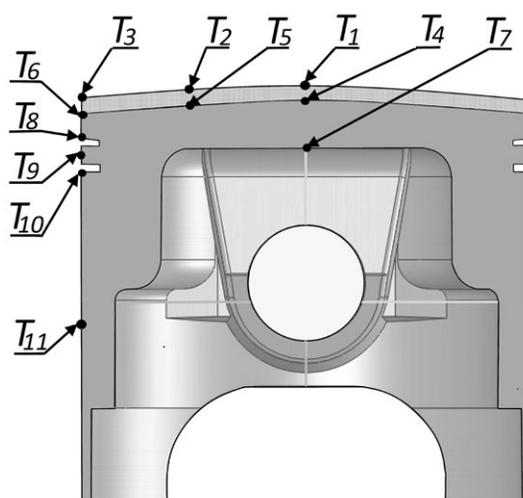


Рис. 3. Точки зондирования температуры в поршне.
Fig. 3. Temperature gauging points in the piston.

в центре днища поршня на поверхности, расположенной со стороны картера — точка T_7 .

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСХОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с тем, что прогар иногда наблюдается и в области поршневых канавок, то в качестве дополнительных результатов моделирования определялось влияние МДО-покрытия на температуру в области канавок (T_8-T_{10}). В качестве дополнительного параметра определялась температура на юбке поршня в точке T_{11} , которая располагается на середине ее высоты.

АНАЛИЗ В ПОДГРУППАХ

Для анализа распределения температур в поршне все полученные результаты были разбиты по подгруппам. В первую группу вошли температуры, позволяющие оценить нагрев днища поршня с МДО-покрытием (T_1 , T_2 и T_3). Во вторую группу вошли температуры, характеризующие состояние металлической поверхности днища поршня под покрытием — T_4 , T_5 , T_6 . Температурное состояние в зоне поршневых канавок позволяют оценить температуры T_8 , T_9 и T_{10} , которые вошли в третью группу замеров. Температуры T_7 и T_{11} являются самостоятельными измерениями.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ИСХОДОВ

Для регистрации температур в конкретных точках поршня использовался инструмент SolidWorks Simulation,

называемый зондом. Благодаря этому инструменту можно определить температуру в конкретном конечном элементе исследуемого объекта.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Принципы расчета размера выборки:

Разбиение данных моделирования на группы позволило оценить температуру в отдельных областях поршня. В сформированных подгруппах рассчитывалось среднее значение температур, как среднее арифметическое. Средняя температура на покрытии в подгруппе 1 (T_{cp1}) рассчитывалась, как среднее арифметическое значений T_1 , T_2 и T_3 . Аналогично рассчитывалось среднее значение температур в подгруппе 2 — T_{cp2} и в подгруппе 3 — T_{cp3} .

Методы статистического анализа данных:

Статистический анализ данных не проводился в связи с тем, что результаты исследований были получены методом конечных элементов и не содержат случайной и инструментальной погрешностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В результате моделирования был получен массив данных по температурам в отдельных точках поршня.

Основные результаты исследования

Все данные по температурам в точках зондирования поршня с МДО-покрытием на днище представлены в табл. 3.

Таблица 3. Температуры поршня с разной толщиной МДО-покрытия

Table 3. Temperatures of the piston with various thickness of the MAO-coating

Толщина МДО-покрытия, мкм	Температура в точках зондирования, К										
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
<i>для поршня из сплава АК4-1</i>											
0	–	–	–	619	603	582	608	575	527	512	498
50	625	609	585	618	601	581	605	573	526	512	495
150	626	613	594	617	600	580	604	572	525	511	496
250	627	617	605	616	599	579	604	572	525	510	496
350	630	621	616	620	602	581	607	573	524	510	495
<i>для поршня из сплава АК12д</i>											
0	–	–	–	624	612	585	611	577	527	511	499
50	644	622	593	620	603	581	605	574	526	512	498
150	645	635	618	618	601	580	605	572	524	509	495
250	645	646	644	615	598	577	603	570	523	508	494
350	645	657	668	613	603	574	600	568	522	507	494

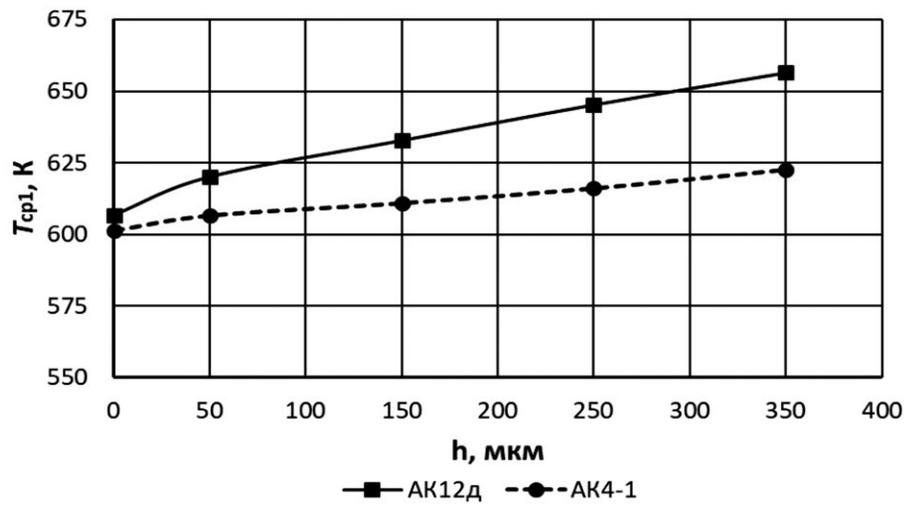


Рис. 4. Средняя температура на поверхности днища поршня.

Fig. 4. Average temperature at the piston head surface.

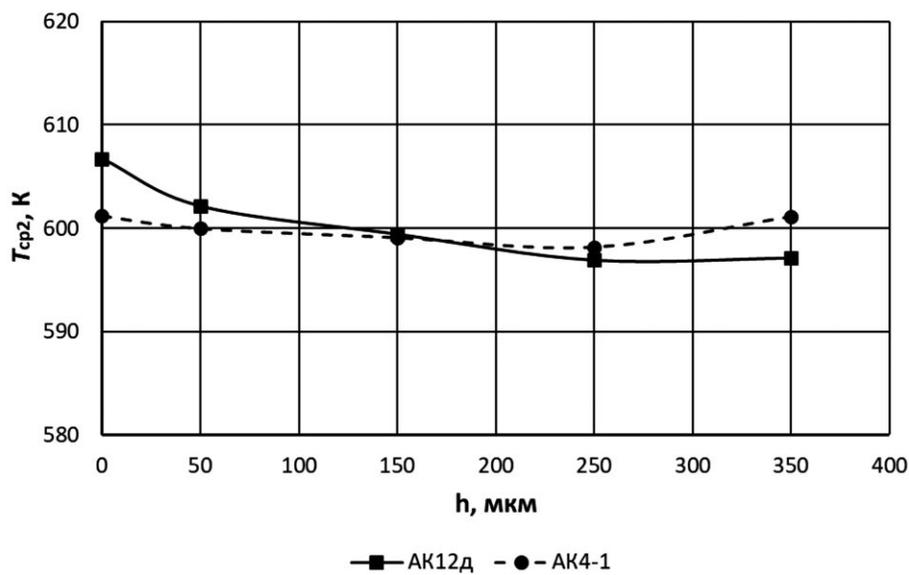


Рис. 5. Средняя температура на поверхности днища поршня под МДО-покрытием.

Fig. 5. Average temperature at the piston head surface under the coating.

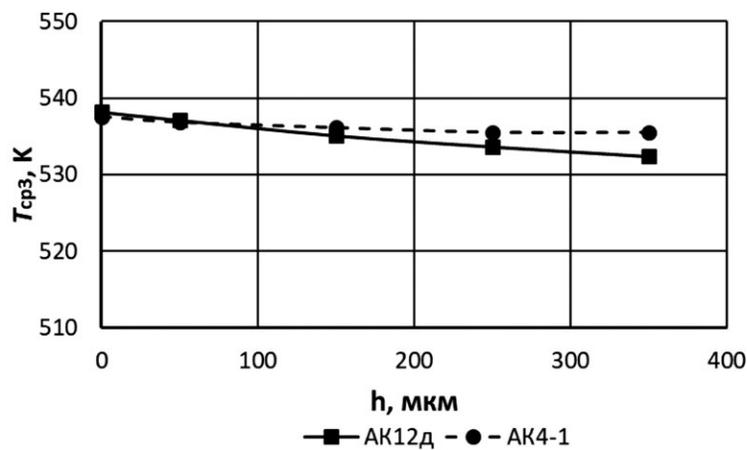


Рис. 6. Средняя температура в области поршневых канавок.

Fig. 6. Average temperature in the area of piston grooves.

Дополнительные результаты исследования

Результаты обработки данных, по подгруппам 1, 2 и 3 представлены на рис. 4, 5 и 6, соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Анализ полученных данных показал, что наличие МДО-покрытия на днище поршня снижает его тепловую напряженность не зависимо от химического состава алюминиевого сплава. Эффективность тепловой защиты повышается при увеличении толщины МДО-покрытия и снижении его коэффициента теплопроводности. Наибольший теплозащитный эффект наблюдается у поршня из эвтектического сплава АК12д.

Обсуждение основного результата исследования

Обнаружено, что при отсутствии керамического покрытия свойства алюминиевого сплава мало влияют на тепловое состояние поршней. Температуры в области поршневых канавок и на юбке (в точках T_8 , T_9 , T_{10} и T_{11}) и у поршня из сплава АК4-1, и у поршня из сплава АК12д практически одинаковы — отличаются не более, чем на 2 К. Температура днища у поршня из АК4-1 ниже в среднем на 5 К, из-за того, что этот сплав имеет больший коэффициент теплопроводности, в результате чего улучшается отвод теплоты от днища и его температура понижается (см. табл. 3).

МДО-покрытие на днище снижает температуру металла поршня. Наибольший эффект у поршня из АК4-1 зафиксирован при толщине покрытия 250 мкм, температура в центре днища под МДО-покрытием уменьшается на 3 К по сравнению с непокрытым поршнем. Однако увеличение толщины покрытия до 350 мкм приводит к росту температуры на поверхности самого покрытия, что приводит к росту температуры под покрытием. В результате теплозащитный эффект от толстого покрытия (350 мкм) на поршне из сплава АК4-1 практически исчезает.

Установлено, что температура в центре днища поршня (точка T_4) из сплава АК12д снижается на 11 К при толщине покрытия 350 мкм (см. рис. 5), что связано с низким коэффициентом теплопроводности МДО-покрытия. Зависимость средней температуры под покрытием на поршне из сплава АК12д соответствует уравнению:

$$T_{cp2(АК12д)} = 604,6 - 0,026h, \quad (1)$$

где T_{cp2} — средняя температура поршня под керамическим покрытием, К; h — толщина керамического покрытия, мм.

Для поршня из сплава АК4-1 это уравнение имеет вид:

$$T_{cp2(АК4-1)} = 600,2 - 0,002h, \quad (2)$$

Снижение температуры в области поршневых канавок также зависит от толщины МДО-покрытия на днище и при толщине 350 мкм для поршня из АК4-1 составляет в среднем 2,3 К, а для поршня из АК12д — 6 К. Описать влияние керамического покрытия на температуру в области поршневых канавок можно следующими линейными зависимостями (см. рис. 6):

$$T_{cp3(АК12д)} = 538 - 0,017h, \quad (3)$$

$$T_{cp3(АК4-1)} = 537,3 - 0,006h, \quad (4)$$

где T_{cp3} — средняя температура поршня в области поршневых канавок, К.

Температура в точке T_7 , которая расположена на днище поршня со стороны картера, снижается благодаря керамическому покрытию на поршне из АК4-1 на 4 К при 250 мкм и на поршне АК12д на 11 К при толщине 350 мкм (см. табл. 3).

Температура на юбке поршня в точке T_{11} благодаря керамическому покрытию также снижается: при толщине 350 мкм снижение составляет 5 К на поршне из АК12д и 3 К на поршне из АК4-1 (табл. 3).

МДО-покрытие способствует увеличению температуры на его поверхности, причем, чем ниже коэффициент теплопроводности керамического покрытия, тем выше эта температура (рис. 4). У МДО-покрытия на сплаве АК12д коэффициент теплопроводности — 1,6 Вт/(м·К), а на сплаве АК4-1 — 4,5 Вт/(м·К). В следствии этого при толщине керамического покрытия 350 мкм на поверхности поршня из сплава АК12д наблюдается увеличение температуры на 50 К, при тех же условиях рост температуры на днище поршня из АК4-1 составил 21 К (рис. 4). Зависимость средней температуры на поверхности покрытия T_{cp1} для поршней из разных сплавов можно представить следующими уравнениями:

$$T_{cp1(АК12д)} = 610,4 - 0,137h,$$

$$T_{cp1(АК4-1)} = 602,2 - 0,058h.$$

Ограничения исследования

Несмотря на то, что определенные в данной работе распределения температур в поршне получены для конкретного двухтактного двигателя, однако этот эффект может быть отнесен и к поршням других ДВС. Если известны химический состав материала поршня и температуры у поршня без покрытия, то базируясь на уравнениях (1)–(4) можно спрогнозировать температуры в разных зонах поршня с МДО-покрытием, сформированным на его днище.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что МДО-покрытие на днище поршня ДВС является эффективным способом снижения тепловой

напряжённости поршней из алюминиевых сплавов. Температура поршня снижается и под керамическим покрытием, и под днищем поршня со стороны картера, и в области поршневых канавок, и на юбке поршня. Повышение толщины МДО-покрытия увеличивает эффективность тепловой защиты поршней. Снижение коэффициента теплопроводности МДО-покрытия приводит к росту температуры на его поверхности и увеличению теплозащитного эффекта. Наибольший теплозащитный эффект наблюдается на поршне из эвтектического сплава.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.Ю. Дударева — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, проведение моделирования, подготовка и написание текста статьи, интерпретация результатов; А.В. Коломейченко — сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи; Ю.Е. Кисель — сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных

с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНИТ).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. N.Y. Dudareva — literature review, collection and analysis of literary sources, performing simulations, preparation and writing of the text of the article, interpretation of the results; A.V. Kolomeichenko — collection and analysis of literary sources, editing of the article; Yu.E. Kisel — collection and analysis of literary sources, editing of the article. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment No. FEUE-2023-0007 (UUST).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Razuvaev A.V., Slobodina E.N. The operating conditions of the internal combustion engine with high temperature cooling // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1441, N 1. P. 012026. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012026
- Белов В.П., Апельинский Д.В., Беженарь В.Н. Экспериментальная оценка температурного состояния поршней тракторных дизелей // *Тракторы и сельхозмашины.* 2022. Т. 89, № 2. С. 111–120. doi: 10.17816/0321-4443-105717
- Caldera M., Massone J.M., Martinez R.A. Failure analysis of a damaged direct injection diesel engine piston // *Journal of Failure Analysis and Prevention.* 2017. N 17. P. 979–988. doi: 10.1007/s11668-017-0327-y
- Li Z., Li J., Chen Z., et al. Experimental and computational study on thermomechanical fatigue life of aluminium alloy piston // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures.* 2021. N 44. P. 141–155. doi: 10.1111/ffe.13342
- Alshmiri F. Lightweight material: Aluminium high silicon alloys in the automotive industry // *Advanced Materials Research Vols.* 2013. N 774–776. P. 1271–1276. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1271
- Гоц А.Н., Глинкин С.А. Критерии разрушения теплонапряженных деталей поршневых двигателей и обзор методик оценки долговечности поршней // *Тракторы и сельхозмашины.* 2016. № 11. С. 40–44. EDN: WYQMYL
- Sergeev S., Albieri M.S., Yatsenko V., et al. Theoretical and practical study of possibility to decrease thermal stress in pistons of internal combustion diesel engine by using galvanic plasma modification // *International Journal of Advanced Science and Technology.* 2019. Vol. 28, N 8. P. 550–562. doi: 10.13140/RG.2.2.32284.44162
- Helmisyah A.J., Ghazali M.J., Abdullah S. Characterisation of thermal barrier coating on piston crown for compressed natural gas direct injection (CNGDI) engines // *Applied Science and Engineering Progress.* 2012. Vol. 5, N 4. P. 73–77. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.663.304
- Abhinav T., Kustagi H.K., Shankar A.R. Adhesion Strength of Plasma Sprayed Coatings — A Review // *Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. Smart Innovation, Systems and Technologies.* 2020. N 169. P. 77–83. doi: 10.1007/978-981-15-1616-0_8
- Markov M.A., Bykova A.D., Krasikov A.V., et al. Formation of wear- and corrosion-resistant coatings by the microarc oxidation of aluminum // *Refractories and Industrial Ceramics.* 2018. Vol. 4, N 59. P. 207–214. doi: 10.1007/s11148-018-0207-3
- Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое окисление: теория, технология, оборудование. Москва: ЭКОМЕТ, 2005.
- Kolomeichenko A.V., Kravchenko I.N. Elemental composition and microhardness of the coatings prepared on faced aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation in a silicate-alkaline electrolyte // *Russian Metallurgy (Metally).* 2019. Vol. 2019, N 13. P. 1410–1413. doi: 10.1134/S0036029519130147
- Басинюк В.Л., Коломейченко А.В., Мардосевич Е.И. и др. Тепловая нагруженность фрикционного контакта деталей из алюминиевых сплавов с покрытиями Al₂O₃ // *Трение и износ.* 2005. Т. 26, № 3. С. 62–70.

14. Curran J.A., Kalkanci H., Magurova Yu. Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications // *Surface and Coatings Technology*. 2007. N 201. P. 8683–8687. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.06.050
15. Dudareva N.Yu., Gallyamova R.F. Structure and thermophysical properties of coatings formed by the method of microarc oxidation on an aluminum alloy AK4-1 // *Solid State Phenomena*. 2018. N 284. P. 1235–1241. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1235
16. Dudareva N. Yu., Ivashin P.V., Kruglov A.B. Investigation of the thermophysical properties of the oxide layer formed by microarc oxidation on Al-Si alloy // *MATEC Web of Conferences*. 2017. N 129. P. 02015. doi: 10.1051/mateconf/201712902015
17. Марьин Д.М., Хохлов А.Л., Шлущенко А.А. и др. Влияние оксидированного слоя на теплонапряженность поршня двигателя внутреннего сгорания // *Science and world*. 2014. Т. 1, № 5. С. 108–109.
18. Subaeva A.K., Khokhlov A.L. The thermal factor reduction of the piston in the internal combustion engine by the method of micro-arc oxidation of the head // *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication*. 2017. Special Edition. P. 1749–1756. doi: 10.7456/1070DSE/155
19. Шпаковский В.В. Влияние частично-динамической теплоизоляции на температурное состояние поверхности поршня // *Двигатели внутреннего сгорания*. 2010. № 2. С. 92–95. EDN: ПТУТРХ
20. Shackelford J. F., Doremus R.H. *Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing*. New York: Springer, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-73362-3
21. Nudehi S., Steffen J.R. *Analysis of Machine Elements Using SolidWorks Simulation 2016*. Mission, KS: SDC Publications, 2016.
22. *An Introduction to Stress Analysis Applications with SolidWorks Simulation, Student Guide Massachusetts*. USA: Massachusetts, 2010.
23. Горбачев В.Г., Загайко С.А., Рудая Н.В., и др. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Уфа: УГАТУ, 1995.
24. Musin N., Dudareva N. Investigation of the effect of the coating formed by microarc oxidation on the piston top on the thermal state of the internal combustion engine parts // *MATEC Web of Conferences*. 2018. N 224. P. 03008. doi: 10.1051/mateconf/201822403008
25. Захаров В.В. Влияние дополнительного отжига перед закалкой на свойства плакированных листов из сплава АК4-1ч, изготовленных по технологии ОАО «КУМЗ» // *Технология легких сплавов*. 2023. № 1. С. 6–11. EDN: GNAOKQ doi: 10.24412/0321-4664-2023-1-6-11
26. Mechalikh M., Benhammou A., Zidane I., et al. Study of piston thermo-elastic behaviour under thermomechanical solicitations // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 16, N 4. P. 7287–7298.
27. Liu Y., Lei J., Niu X., et al. Experimental and simulation study on aluminium alloy piston based on thermal barrier coating // *Scientific Reports*. 2022. N 12. P. 10991. doi: 10.1038/s41598-022-15031-x
28. Белецкий В.М., Кривов Г.А. *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Справочник. Киев: Коминтех, 2005.
29. Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation*. Москва: ДМК-Пресс, 2010.

REFERENCES

1. Razuvaev AV, Slobodina EN. The operating conditions of the internal combustion engine with high temperature cooling. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1441(1):012026. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012026
2. Belov VP, Apelinskiy DV, Bezhenar VN. Experimental assessment of the temperature state of tractor diesel pistons. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(2):111–120. doi: 10.17816/0321-4443-105717
3. Caldera M, Massone JM, Martinez RA. Failure analysis of a damaged direct injection diesel engine piston. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017;17:979–988. doi: 10.1007/s11668-017-0327-y
4. Li Z, Li J, Chen Z, et al. Experimental and computational study on thermomechanical fatigue life of aluminium alloy piston. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021;44:141–155. doi: 10.1111/ffe.13342
5. Alshmiri F. Lightweight material: Aluminium high silicon alloys in the automotive industry. *Advanced Materials Research Vols*. 2013;774-776:1271–1276. doi: 10.4028/www.scientific.net /AMR.774-776.1271
6. Gots AN, Glinkin SA. Failure criteria of heat-stressed parts of piston engines and the review of methods for assessment of pistons durability. *Tractors and agricultural machines*. 2016;11:40–44. (In Russ). EDN: WYQMYL
7. Sergeev S, Albieri MS, Yatsenko V, et al. Theoretical and practical study of possibility to decrease thermal stress in pistons of internal combustion diesel engine by using galvanic plasma modification. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2019;28(8):550–562. doi: 10.13140/RG.2.2.32284.44162
8. Helmysyah AJ, Ghazali MJ, Abdullah S. Characterisation of thermal barrier coating on piston crown for compressed natural gas direct injection (CNGDI) engines. *Applied Science and Engineering Progress*. 2012;5(4):73–77. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.663.304
9. Abhinav T, Kustagi HK, Shankar AR. Adhesion Strength of Plasma Sprayed Coatings — A Review. *Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2020;169:77–83. doi: 10.1007/978-981-15-1616-0_8
10. Markov MA, Bykova AD, Krasikov AV, et al. Formation of wear- and corrosion-resistant coatings by the microarc oxidation of aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;4(59):207–214. doi: 10.1007/s11148-018-0207-3
11. Suminov IV, Epelfeld AV, Lyudin VB, et al. *Microarc oxidation: theory, technology, equipment*. Moscow: ECOMET; 2005. (In Russ).
12. Kolomeichenko AV, Kravchenko IN. Elemental composition and microhardness of the coatings prepared on faced aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation in a silicate-alkaline electrolyte. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;(13):1410–1413. doi: 10.1134/S0036029519130147
13. Basinyuk VL, Kolomeichenko AV, Mardosevich EI, et al. Thermal state of friction contact of aluminum — alloy parts coated with Al₂O₃. *Journal of Friction and Wear*. 2005;26(3):62–70.

14. Curran JA, Kalkanç H, Magurova Yu. Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201:8683–8687. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.06.050
15. Dudareva NYu, Kruglov AB, Gallyamova RF. Structure and thermophysical properties of coatings formed by the method of microarc oxidation on an aluminum alloy AK4-1. *Solid State Phenomena*. 2018;284:1235–1241. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1235
16. Dudareva NYu, Ivashin PV, Kruglov AB. Investigation of the thermophysical properties of the oxide layer formed by microarc oxidation on Al-Si alloy. *MATEC Web of Conferences*. 2017;129:02015. doi: 10.1051/mateconf/201712902015
17. Mar'in DM, Khokhlov AL, Shlushchenko AA, et al. Influence of oxidized layer on thermal stress of internal combustion engine pistons. *Science and world*. 2014;1(5):108–109. (In Russ).
18. Subaeva AK, Khokhlov AL. The thermal factor reduction of the piston in the internal combustion engine by the method of micro-arc oxidation of the head. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication TOJDAG*. 2017:1749–1756. doi: 10.7456/1070DSE/155
19. Shpakovsky VV. Influence of partially dynamic thermal insulation on the temperature state of the piston surface. *Internal combustion engines*. 2010;2:92–95. (in Russ). EDN: TTYTPX
20. Shackelford JF, Doremus RH. *Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing*. New York : Springer; 2008. doi: 10.1007/978-0-387-73362-3
21. Nudehi S, Steffen JR. *Analysis of Machine Elements Using SolidWorks Simulation 2016*. Mission, KS: SDC Publications; 2016.
22. MTI. *An Introduction to Stress Analysis Applications with SolidWorks Simulation, Student Guide Massachusetts*. USA: Massachusetts; 2010.
23. Gorbachev VG, Zagayko SA, Rudaya NV, et al. *Simulation system "Albea" (core). User Manual*. Ufa : UGATU, 1995. (In Russ).
24. Musin N, Dudareva N. Investigation of the effect of the coating formed by microarc oxidation on the piston top on the thermal state of the internal combustion engine parts. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:03008. doi: 10.1051/mateconf/201822403008.
25. Zakharov VV. The effect of additional annealing before quenching on the properties of clad sheets made of AK4-1h alloy manufactured according to the technology of LLC "KUMZ". *Technology of light alloys*. 2023;1:6–11. (In Russ). doi: 10.24412/0321-4664-2023-1-6-11
26. Mechalikh M, Benhammou A, Zidane I, et al. Study of piston thermo-elastic behaviour under thermomechanical solicitations. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2019;16(4):7287–7298
27. Liu Y, Lei J, Niu X, et al. Experimental and simulation study on aluminium alloy piston based on thermal barrier coating. *Scientific Reports*. 2022;12:10991. doi: 10.1038/s41598-022-15031-x
28. Beletsky VM, Krivov GA. *Aluminum alloys (composition, properties, technology, application). Guide*. Kiev: Komintech; 2005. (In Russ).
29. Alyamovsky AA. *Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK-Press; 2010. (in Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Дударева Наталья Юрьевна,

д-р техн. наук,
доцент, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания;
адрес: Российская Федерация, 450076, Уфа,
улица З. Валиди, д. 32;
ORCID: 0000-0003-2269-0498;
eLibrary SPIN: 6069-6928;
e-mail: dudareva.nyu@ugatu.su

Коломейченко Александр Викторович,

д-р техн. наук,
профессор; заведующий отделом перспективных технологий
Центра сельскохозяйственного машиностроения;
ORCID: 0000-0002-3865-4486;
eLibrary SPIN: 2560-5163;
e-mail: a.kolomeychenko@nami.ru

Кисель Юрий Евгеньевич,

д-р техн. наук,
доцент, профессор кафедры общетехнических дисциплин
и физики;
ORCID: 0000-0002-5986-3922;
eLibrary SPIN: 9996-2193;
e-mail: ypk2@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Natalia Yu. Dudareva,

Dr. Sci. (Engineering),
Associate Professor, Professor of the of Internal Combustion
Engines Department;
address: 32 Z. Validie street, 450076 Ufa, Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-2269-0498;
eLibrary SPIN: 6069-6928;
e-mail: dudareva.nyu@ugatu.su

Alexander V. Kolomeichenko,

Dr. Sci. (Engineering),
Professor; Head of the Advanced Technologies Department
of the Center for Agricultural Engineering;
ORCID: 0000-0002-3865-4486;
eLibrary SPIN: 2560-5163;
e-mail: a.kolomeychenko@nami.ru

Yury E. Kisel,

Dr. Sci. (Engineering),
Associate Professor; Professor of the General Technical
Disciplines and Physics Department;
ORCID: 0000-0002-5986-3922;
eLibrary SPIN: 9996-2193;
e-mail: ypk2@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author