

Влияние керамического покрытия днища поршня на тепловое состояние деталей двигателя и распределение тепловых потоков в камере сгорания

Методом численного моделирования исследовано влияние покрытия, сформированного на днище поршня по технологии микродугового оксидирования, на тепловое состояние деталей двигателя и распределение тепловых потоков в камере сгорания. Установлено, что покрытие снижает температуру металла поршня, тем самым уменьшая вероятность его прогара, также уменьшается тепловой поток из камеры сгорания.

Н.Ю. ДУДАРЕВА,
д-р техн. наук
(УУНУТ, Уфа)

dudareva.nyu@ugatu.su

Двигатель внутреннего сгорания, поршень, покрытие, микродуговое оксидирование, керамика, температура, тепловые потоки, камера сгорания

Перспективным направлением современного поршневого двигателестроения является повышение мощности проектируемых двигателей внутреннего сгорания. Однако увеличение мощности сопровождается ростом температуры рабочих газов и давления в камере сгорания [1–4]. Из-за высокой температуры рабочих газов возможен перегрев деталей двигателя, а вследствие высокого давления могут разрушиться детали.

Другой важной тенденцией является снижение веса двигателей, что позволяет улучшить их удельные эксплуатационные показатели [5]. Из конструкционных материалов минимальной плотностью характеризуются алюминиевые сплавы. Однако некоторые свойства этих сплавов не вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к двигателям внутреннего сгорания. У алюминиевых сплавов относительно низкая температура плавления, недостаточная коррозионная стойкость и низкая износостойкость [6, 7].

Из-за использования алюминиевых сплавов в современных двигателях внутреннего сгорания требуется защита поверхностей деталей от негативных воздействий. Как средство защиты могут применяться керамические покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования [8–10], характеризующиеся высокой микротвердостью (до 22 ГПа), износостойкостью, теплостойкостью. Кроме этого, покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования, имеют низкий коэффициент теплопроводности 0,8–5,5 Вт/(м·К), поэтому возможна защита деталей двигателей от высоких температур и уменьшение вероятности образования прогара [11, 12].

Однако из-за керамических покрытий, защищающих поверхности деталей от износа и прогара, возможно изменение теплового состояния отдельных деталей цилиндропоршневой группы двигателя и характера распределения температур и тепловых потоков в камере сгорания [13, 14]. Влияние таких покрытий на тепловое состояние отдельных деталей двигателей внутреннего сгорания (гильз и поршней) на настоящий момент исследовано достаточно полно [15, 16]. Влияние же данных покрытий на тепловое состояние деталей двигателя в целом и на распределение тепловых потоков в камере сгорания изучено недостаточно, что связано со сложностью расчетов и требованиями учета множества различных факторов (свойств материалов и покрытий, температурных нагрузок, конфигурации деталей камеры сгорания). Однако с помощью современных программ численного моделирования возможно решать подобные задачи [17].

Наиболее часто керамические покрытия наносят на днища поршней двигателя внутреннего сгорания для предотвращения их прогара. В связи с этим была сформулирована цель работы – исследование влияния керамического покрытия днища поршня на тепловое состояние деталей и распределение тепловых потоков в камере сгорания двигателя.

Исследования в данной работе проводились в программе SolidWorks Simulation [18] с широким набором инструментов для различных видов анализа, включая термический. Особенности данной программы являются интегрированность с программой 3D-моделирования SolidWorks [19], большая база материалов и относительная простота использования.

Для проведения моделирования использовались упрощенные 3D-модели деталей поршневого двигателя марки РМЗ-551i [20]. Данный двигатель был выбран в качестве модели в связи с тем, что в ранее проведенных исследованиях были рассчитаны максимальные давление и температура в камере сгорания, а также температура и коэффициенты теплоотдачи для различных поверхностей поршня [16]. Недостающие значения температур и коэффициентов теплоотдачи были рассчитаны по известным методикам.

Сначала была выполнена сборка деталей цилиндропоршневой группы двигателя. Сборка, проводившаяся в программе SolidWorks, состояла из четырех деталей, которые формируют камеру сгорания, – гильзы, поршня, покрытия днища поршня и головки (рис. 1, а). Модель покрытия по форме и размерам повторяла днище поршня. 3D-модели гильзы и головки двигателя были выполнены упрощенно с целью снижения трудоемкости расчетов.

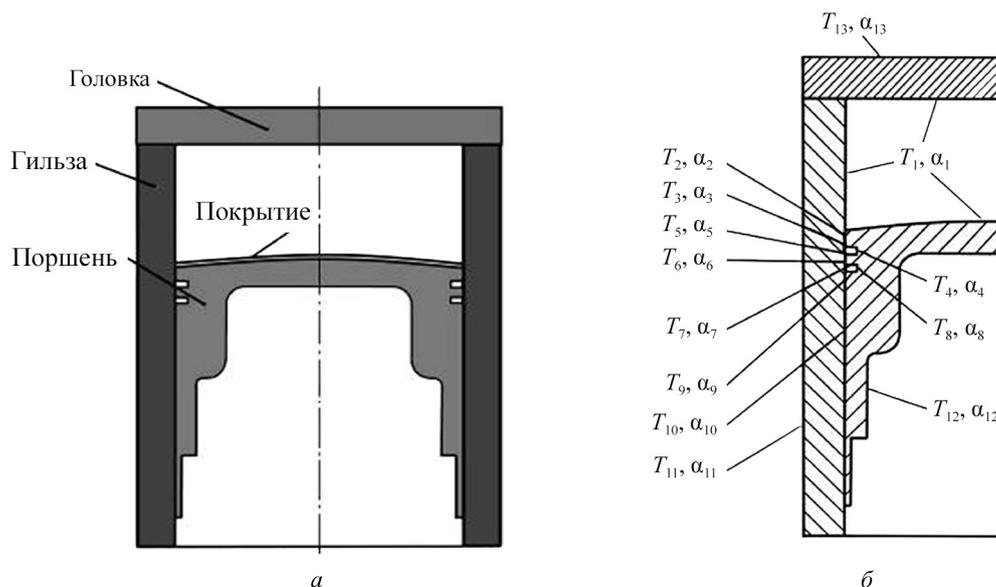


Рис. 1

Для сборки деталей использовались такие типы сопряжения деталей, как концентричность (между поршнем и гильзой, между поршнем и покрытием, между гильзой и головкой), совпадение (между поверхностью покрытия и днищем поршня, между торцевыми поверхностями гильзы и головки), а также сопряжение «расстояние», чтобы расположить поршень на определенном расстоянии от головки (см. рис. 1, а). Поршень располагался на расстоянии 31 мм от головки, что соответствует положению поршня между верхней мертвой точкой и нижней мертвой точкой.

Перед проведением моделирования указывались материалы используемых деталей. Материал поршня – алюминиевый сплав марки М244, который применяется для изготовления реального поршня модельного двигателя [21]. Материал покрытия – керамический материал с коэффициентом теплопроводности 1,6 Вт/(м·К) [11, 12]. Для головки блока использовался алюминиевый сплав марки АК8, для гильзы – сталь марки 30ХГС. Свойства данных материалов, которые задавались и учитывались при проведении расчетов, указаны в табл. 1 [21–23].

Таблица 1

Параметры материалов	Поршень (сплав М244)	Покрытие (керамика)	Гильза (сталь 30ХГС)	Головка сплав АК8)
Плотность ρ , кг/м ³	2680	2720	7600	2700
Коэффициент теплового линейного расширения, $\alpha_L \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	2,34	0,52	1,50	2,40
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	165,0	1,6	38,0	200,0
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	970	1032	440	900

К поверхностям 3D-моделей деталей двигателя прикладывались температурные нагрузки, представленные температурой среды T_i и коэффициентами конвективной теплоотдачи α_i : $T_1 = 141$ К, $\alpha_1 = 592$ Вт/(м²·К); $T_2 = 1413$ К, $\alpha_2 = 148$ Вт/(м²·К); $T_3 = 573$ К, $\alpha_3 = 97$ Вт/(м²·К); $T_4 = 573$ К, $\alpha_4 = 1818$ Вт/(м²·К); $T_5 = 573$ К, $\alpha_5 = 11609$ Вт/(м²·К); $T_6 = 423$ К, $\alpha_6 = 148$ Вт/(м²·К); $T_7 = 423$ К, $\alpha_7 = 97$ Вт/(м²·К); $T_8 = 423$ К, $\alpha_8 = 1818$ Вт/(м²·К); $T_9 = 423$ К, $\alpha_9 = 11609$ Вт/(м²·К); $T_{10} = 473$ К, $\alpha_{10} = 1485$ Вт/(м²·К); $T_{11} = 323$ К, $\alpha_{11} = 1805$ Вт/(м²·К); $T_{12} = 363$ К, $\alpha_{12} = 174$ Вт/(м²·К); $T_{13} = 298$ К, $\alpha_{13} = 2330$ Вт/(м²·К). Схема приложения температурных нагрузок представлена на рис. 1, б.

После того как были заданы температурные нагрузки на поверхности 3D-моделей деталей, перед началом расчетов на деталях была построена сетка конечных элементов. Задавалось высокое качество сетки, построение выполнялось с учетом смешанной кривизны граней.

Исследования осуществлялись поэтапно. На первом этапе расчеты проводились в сборке без покрытия, на втором – в сборке с покрытием поршня толщиной 100 мкм. На третьем этапе толщина покрытия составляла 200 мкм, на четвертом – 300 мкм, на пятом этапе – 400 мкм. Выбранный диапазон толщин основывался на реально возможной толщине покрытия, которую может обеспечить технология микродугового оксидирования.

После проведения расчетов при помощи специального инструмента SolidWorks Simulation – зонда – определялись значения температур в отдельных точках на поверхностях деталей. Зондирование проводилось в двадцати точках, которые располагались на поверхности поршня, гильзы и головки. Схема расположения точек зондирования показана на рис. 2, а. Кроме температур в указанных точках, также методом зондирования определялась плотность теплового потока q_i . Эти данные затем использовались для расчета общего теплового потока через поверхности деталей. Схема тепловых потоков приведена на рис. 2, б.

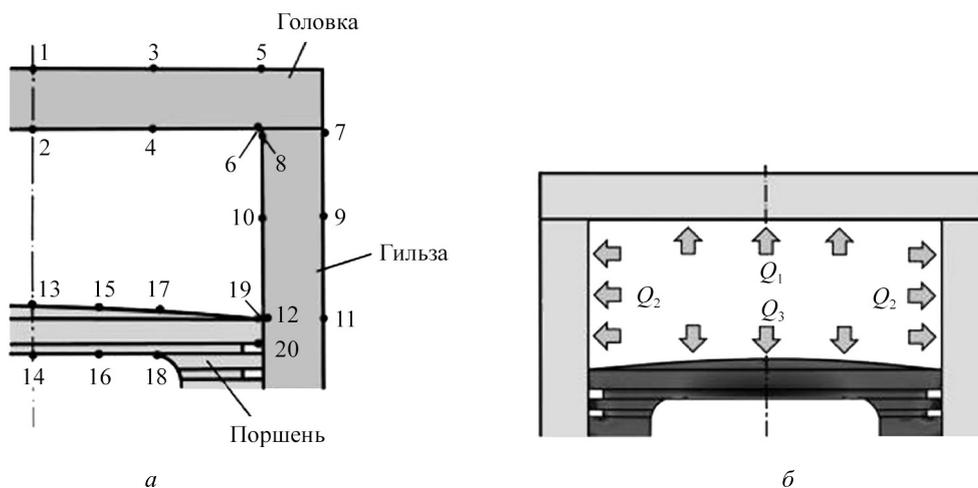


Рис. 2

Для оценки изменения температуры поверхностей деталей измеренные значения температур усреднялись и рассчитывались по следующим формулам:

$$T_{1cp} = \frac{t_2 + 2t_4 + 2t_6}{5}; \quad (1)$$

$$T_{2cp} = \frac{t_8 + t_{10} + t_{12}}{3}; \quad (2)$$

$$T_{3cp} = \frac{t_{13} + 2t_{15} + 2t_{17} + 2t_{19}}{7}, \quad (3)$$

где T_{1cp} , T_{2cp} , T_{3cp} – средние значения температур на внутренней поверхности головки, внутренней поверхности гильзы, внутренней поверхности поршня; t_i – температура в i -й точке измерения, К.

Расчет значения теплового потока через поверхности деталей проводился по следующим формулам:

$$Q_1 = \frac{(q_2 + 2q_4 + 2q_6)S_{\text{гол}}}{5}; \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{(q_8 + q_{10} + q_{12})S_{\text{гильза}}}{3}; \quad (5)$$

$$Q_3 = \frac{(q_{13} + 2q_{15} + 2q_{17} + 2q_{19})S_{\text{п}}}{7}, \quad (6)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – тепловой поток через поверхности головки, гильзы, поршня, Вт; q_i – плотность теплового потока через i -ю точку, Вт/см²; $S_{\text{гол}}, S_{\text{гильза}}, S_{\text{п}}$ – площадь внутренней поверхности головки, гильзы, поршня, см².

При расчете средних значений температур и теплового потока для головки и поршня значения температур и плотностей теплового потока в симметричных точках удваивались (см. уравнения (1), (3), (4), (6)). Для вычисления теплового потока через поверхности использовались предварительно измеренные площади внутренних поверхностей деталей. Площадь поверхности поршня составляла 45,39 см², гильзы – 76,4 см², головки – 45,36 см². Суммарный тепловой поток через поверхности, формирующие объем камеры сгорания Q , Вт, рассчитывался по формуле

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Значения температур в точках зондирования, полученные в результате моделирования на деталях двигателя, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Номер точки	Толщина покрытия, мкм					Номер точки	Толщина покрытия, мкм				
	0	100	200	300	400		0	100	200	300	400
	Температура, К						Температура, К				
1	473,3	473,3	474,3	473,3	473,3	11	436,5	438,2	438,8	438,9	439,0
2	496,6	496,6	496,6	496,6	496,6	12	509,6	510,9	512,2	513,5	514,4
3	467,6	468,1	468,1	468,1	468,1	13	665,2	666,2	703,0	714,3	742,3
4	490,3	490,3	490,3	490,3	490,3	14	654,2	649,6	645,2	641,1	637,3
5	447,4	447,2	447,2	447,2	447,2	15	660,6	675,0	693,7	707,1	737,4
6	469,9	469,9	470,0	470,0	469,9	16	649,4	645,3	640,5	637,2	633,4
7	442,5	442,7	442,7	442,7	442,7	17	646,5	654,1	684,3	705,3	719,4
8	470,9	470,8	471,4	470,9	471,7	18	631,5	627,7	624,2	620,9	617,5
9	468,4	468,0	468,0	468,0	468,1	19	629,3	639,8	672,1	700,0	720,2
10	569,6	568,0	568,0	568,0	568,0	20	622,5	619,2	616,0	613,0	610,2

Значения плотностей теплового потока в точках зондирования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Номер точки	Толщина покрытия, мкм					Номер точки	Толщина покрытия, мкм				
	0	100	200	300	400		0	100	200	300	400
	Плотность теплового потока, q_i , Вт/см ²						Плотность теплового потока, q_i , Вт/см ²				
1	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	11	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
2	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	12	72,8	68,7	69,3	68,4	67,9
3	41,6	41,7	41,7	41,7	41,7	13	43,7	43,1	41,7	40,9	39,9
4	56,0	55,8	55,8	55,8	55,8	14	1,8	2,4	2,5	1,9	1,6
5	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	15	47,3	43,2	42,0	40,8	39,7
6	111,1	87,5	86,9	89,3	91,5	16	16,7	15,3	15,4	14,3	14,0
7	24,5	24,9	25,2	25,2	25,2	17	56,8	44,5	42,9	41,6	40,4
8	138,7	89,4	88,9	93,2	98,8	18	61,6	58,9	56,3	59,8	53,8
9	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	19	45,8	46,1	44,1	43,0	41,7
10	49,7	49,8	49,8	49,8	49,8	20	20,0	19,2	18,8	18,7	18,0

Изменение температуры внутренних поверхностей деталей в зависимости от толщины покрытия на днище поршня, рассчитанные по формулам (1) – (3), представлены на рис. 3.

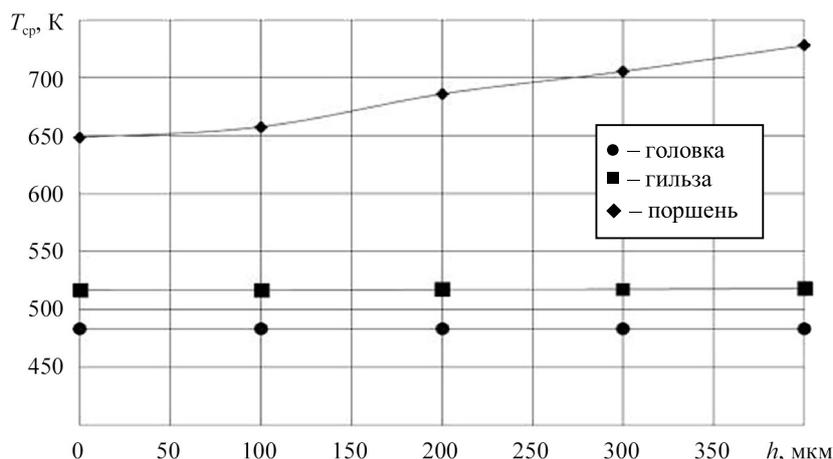


Рис. 3

Согласно полученным данным (см. рис. 3) при использовании покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, увеличилась температура на поверхности поршня (на покрытии). В случае использования покрытия толщиной 400 мкм температура в среднем увеличивается на 80 К. Максимальный прирост температуры наблюдается в точке 19, где ее значение увеличивается на 91 К относительно поверхности поршня без покрытия. Покрытие способствует нагреву и других точек, расположенных на поверхности днища поршня. Этот эффект проявляется вследствие низкой теплопроводности керамического покрытия, в результате поток тепла со стороны камеры сгорания блокируется и поверхность поршня с покрытием нагревается. Однако при этом противоположная поверхность поршня, расположенная со стороны картера, благодаря покрытию становится холоднее в среднем на 15,6 К при толщине покрытия 400 мкм. Наблюдается термоблокирующий эффект керамического покрытия, благодаря чему уменьшается нагрев металла поршня. Покрытие влияет и на температуру других деталей камеры сгорания, но незначительно. Так, при использовании покрытия толщиной 400 мкм температура внутренней поверхности гильзы $T_{2ср}$ увеличилась всего на 1,3 К, а температура внутренней поверхности головки блока $T_{1ср}$ не изменилась.

Влияние толщины покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, на величину суммарного теплового потока через поверхности деталей камеры сгорания, вычисленного по формулам (4) – (7), представлено на рис. 4.

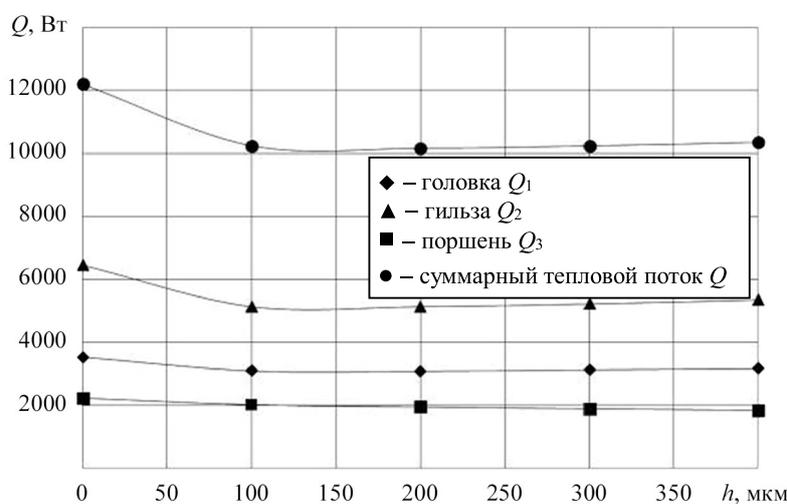


Рис. 4

По результатам расчета тепловых потоков (см. рис. 4), при использовании покрытия днища поршня снижается величина теплового потока через стенки деталей камеры сгорания в среднем на 16 % (примерно 1952 Вт). При этом толщина покрытия на величину снижения теплового потока практически не влияет. В наибольшей степени снижается (на 1238 Вт, или 63,4 %, от общего снижения теплового потока из камеры сгорания) тепловой поток, проходящий через поверхность гильзы. Величина теплового потока, проходящего через поверхность головки, снижается на 410 Вт, что составляет 21 % от общего снижения теплового потока, а через поверхность поршня – на 305 Вт (15,6 %).

Теплота, выделяющаяся при сгорании топлива, расходуется на совершение работы двигателем, а также приводит к увеличению температуры его деталей и отработавших газов. Вследствие уменьшения величины теплового потока из камеры сгорания возможно либо повышение температуры рабочих газов, либо увеличение мощности двигателя. В исследованиях, проводимых в режиме моторных испытаний двигателей с покрытиями, формируемыми методом микродугового оксидирования, на днище поршня наблюдалось повышение мощности примерно на 20 %, при этом поток тепла в поршень снижался приблизительно на 16 % [24, 25]. Эти данные хорошо согласуются с результатами численного эксперимента.

Таким образом, в численных экспериментах показано, что использование покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, на днище поршня является не только эффективным средством защиты поршня от прогара, так как способствует снижению его температуры, но и может способствовать увеличению мощности двигателей внутреннего сгорания.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.П., Апельский Д.В., Беженарь В.Н. Экспериментальная оценка температурного состояния поршней тракторных дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 2022. № 2. С. 111–120.
2. Belmonte R. et al. Improving Heat Transfer and Reducing Mass in a Gasoline Piston Using Additive Manufacturing // Proc. of the SAE 2015 World Congress & Exhibition, April 21–23, 2015, Detroit, USA. SAE Technical Paper № 2015-01-0505.
3. Гарипов М.Д. и др. Исследование сгорания обводненного этанола в поршневом ДВС // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. № 1. С. 28–30.
4. Гортышов Ю.Ф. и др. Влияние добавок водорода в топливо на характеристики газопоршневого двигателя при изменении угла опережения зажигания // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 4. С. 73–74.
5. Alshmiri F. Lightweight Material: Aluminium High Silicon Alloys in the Automotive Industry // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 774-776. P. 1271–1276.
6. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): Справочник. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
7. Семеньчев В.В., Салахов Р.К. Исследование электропроводности полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, применяемых в самолетостроении // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 137–140.
8. Дударева Н.Ю. Моделирование процесса формирования упроченного слоя при микродуговом оксидировании алюминиевых образцов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 3. С. 63–65.
9. Суминов И. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. М.: Техносфера, 2011. Т. 2. 512 с.
10. Марков М.А. и др. Формирование износо- и коррозионно-стойких покрытий микродуговым оксидированием алюминия // Новые огнеупоры. 2018. № 4. С. 124–132.
11. Curran J.A. et al. Mullite-Rich Plasma Electrolytic Oxide Coatings for Thermal Barrier Applications // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Iss. 21. P. 8683–8687.
12. 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. № 129. Article № 002015.
13. Зарубин В.С., Леонов В.В., Зарубин В.С. Нагрев анизотропного слоя теплозащитного покрытия при гиперзвуковом обтекании сферического затупления // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 73–80.
14. Трушин В.А., Трушин О.В. Термобарьерное покрытие турбинной лопатки на переходных режимах работы ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 50–52.
15. Марьин Д.М. и др. Влияние оксидированного слоя на теплонапряженность поршня двигателя внутреннего сгорания // Наука и мир. 2014. № 1 (5). С. 108–109.

16. 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. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. 2018. Vol. 224. Article № 03008.
17. Mauro S. et al. Internal Combustion Engine Heat Release Calculation Using Single-Zone and CFD 3D Numerical Models // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2018. Vol. 9. P. 215–226.
18. Steffen J.R. Nudehi S. Analysis of Machine Elements Using SolidWorks Simulation 2016. Mission: SDC Publications, 2016. 450 p.
19. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. Самоучитель Solidworks 2007. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 343 с.
20. Двигатель РМЗ-551 [Электронный ресурс]. URL: <https://rmdetal.ru/catalog/dlya-snegokhoda/modelnyu-ryad-tayga/tayga-patrul-551-swt/dvigatel-rmz-551/> (дата обращения 14.12.2024).
21. Pistons and Engine Testing / Eds. MAHLE GmbH. Springer, 2016. 295 p.
22. Бабичев А.П. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
23. Свойства материалов [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/> (дата обращения 14.12.2024).
24. 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.
25. Шпаковский В.В. Влияние частично-динамической теплоизоляции на температурное состояние поверхности поршня // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 92–95.

Поступила в редакцию 14.01.25

После доработки 21.01.25

Принята к публикации 31.01.25

Influence of the Piston Crown Ceramic Coating on the Thermal State of Engine Parts and Heat Flows Distribution in the Combustion Chamber

N.YU. DUDAREVA

UUST, Ufa

The influence of the coating formed on the piston crown using the microarc oxidation technology on the thermal state of engine parts and on the heat flows distribution in the combustion chamber is studied using the numerical modeling. It has been established that the coating reduces the temperature of the piston metal, thereby reducing the likelihood of its burnout. The coating on the piston crown also reduces the heat flow from the combustion chamber.

Internal combustion engine, piston, coating, microarc oxidation, ceramics, temperature, heat flows, combustion chamber