

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

²Омский государственный технический университет, г. Омск

³ООО «Моментум», г. Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОРШНЯ ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО КАТАЛИТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Выполнены расчеты теплового и напряженно-деформированного состояния поршней двухтактного бензинового двигателя 1Д 4,5/3,5. В расчетах применялась модель стандартного поршня и поршня, модифицированного каталитическими материалами. Описана методика, применяемая при моделировании статических и термических нагрузок с использованием возможностей программы *SolidWorks Simulation*. Приведен сравнительный анализ результатов моделирования оригинального и модифицированного поршней, оценена работоспособность поршня при модификации поверхности каталитическими материалами.

Для решения тепловых и механических задач была использована методика оценки граничных условий, позволяющая учесть особенности нагружения, а также имеющиеся расчетные и экспериментальные данные, относящиеся к рабочему циклу и индикаторному процессу.

Ключевые слова: каталитические материалы, поршень, двигатель внутреннего сгорания, теплонапряженность.

Введение. Совершенствование бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) связано с улучшением процесса сгорания и повышением его экологической безопасности. Действующие нормы выбросов вынуждают конструкторов искать новые пути повышения экологической безопасности. В работах [1–4] описан способ снижения выбросов СО и СН при помощи внутрицилиндрового катализа, т. е. применением поршней, поверхность которых модифицирована каталитическими материалами с предварительной плазменно-электролитической оксидацией (ПЭО). Данный способ позволяет решить проблему большого количества выбросов указанных веществ при непрогретом ДВС, работающем как в режиме холостого хода, так и на высоких оборотах. Эксплуатация такого поршня предполагается в достаточно жестких условиях. В то же время, вопрос механической и тепловой нагрузки данных поршней мало исследован, что вызывает вопросы об их применении в условиях реальной эксплуатации, поскольку тепловая напряженность

поршня как одного из наиболее нагруженных элементов цилиндропоршневой группы с рабочими температурами до 573 К и выше лимитирует работу компрессионных колец, ухудшает смазывание, является причиной появления трещин с последующим оплавлением кромки поршня, его прогара и разрушения. Немаловажно отметить также, что теплонапряженность сдерживает повышение мощности двигателей, а также тормозит повышение их экологичности [4–6].

Применение поршня, модифицированного каталитическими материалами, может грозить двигателю выходом из строя из-за вероятности прогара днища. Предварительное моделирование поможет снизить риск такого исхода, если программный пакет укажет на критическое превышение допустимых значений.

Для моделирования статического и термического нагружения поршня необходимо было выбрать параметры определённого ДВС. В данной работе использовался одноцилиндровый двухтактный дви-

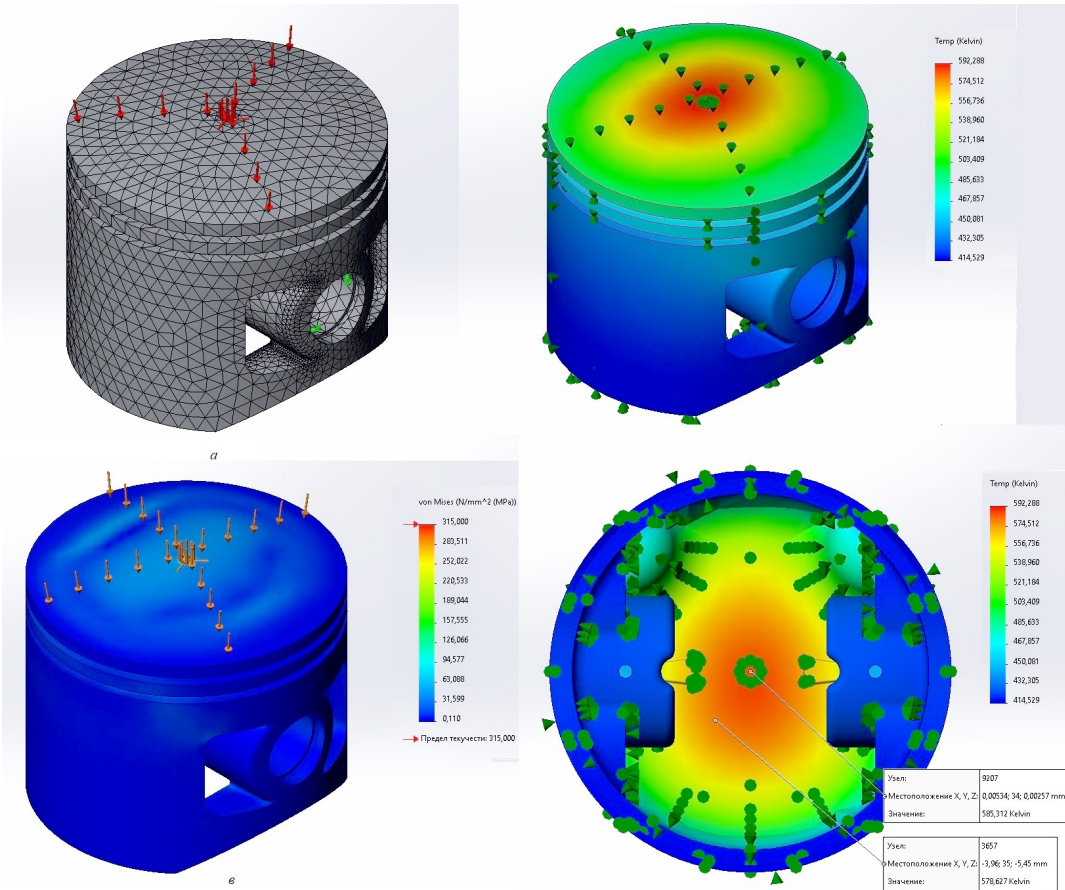


Рис. 1. Расчётная сетка, распределение температур и давлений оригинального поршня

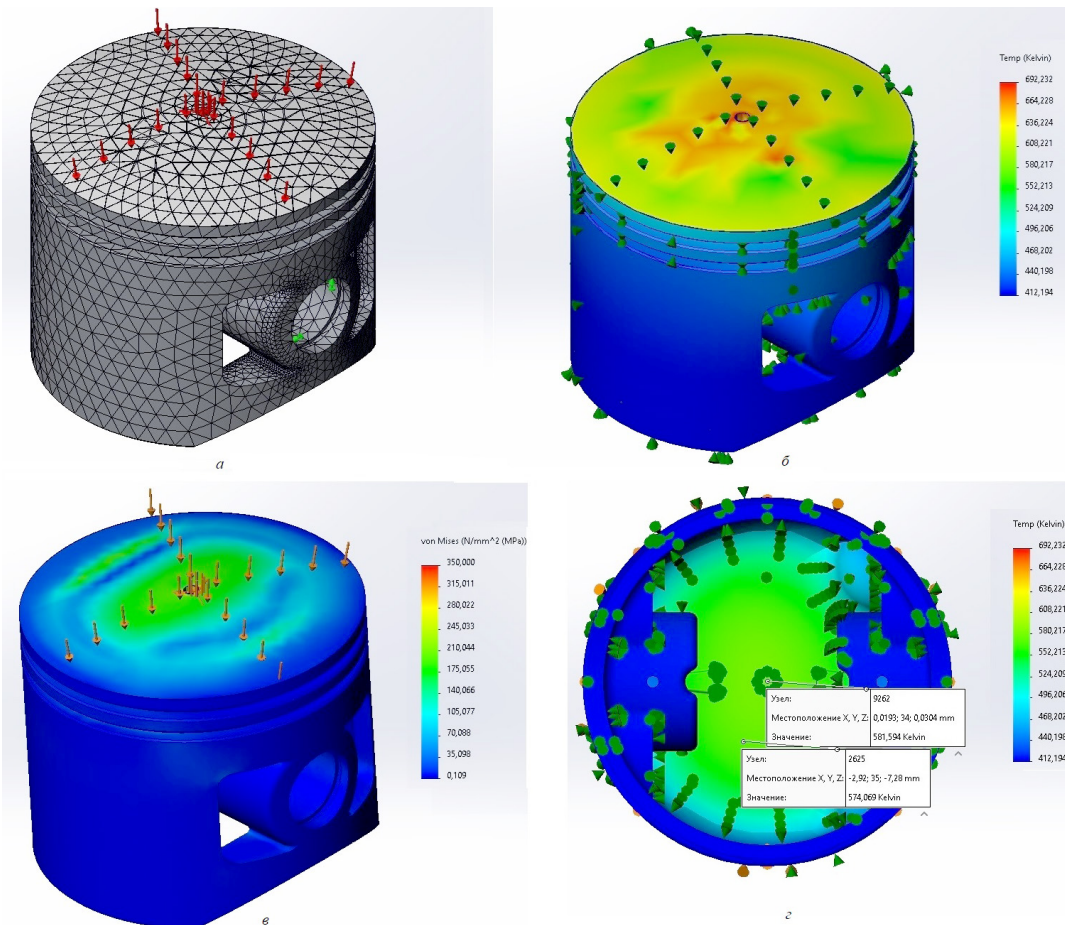


Рис. 2. Расчётная сетка, распределение температур и давлений модифицированного поршня

Значения коэффициентов конвективной теплоотдачи и температуры окружающей среды в цилиндре оригинального и модифицированного ДВС

№ участка	Участок	Оригинальный		Модифицированный	
		T, К	ξ , Вт/м ² ·К	T, К	ξ , Вт/м ² ·К
1	Днище	966,54	1000	992,57	1000
2	Огневой пояс	673	200	673	200
3	1 кольцо (канавка)	443	16142	443	16142
4	1 кольцо (стенка)	443	37296	443	37296
5	2 кольцо (канавка)	443	15916	443	15916
6	2 кольцо (стенка)	433	28313	433	28313
7	Юбка	403	950	403	950
8	Бобышки	380	400	380	400
9	Отверстие поршневого пальца	403	1400	403	1400
10	Внутренняя область	365	100	365	100
11	Кольцевая перемычка	550	700	550	700

Таблица 2

Значения температуры и напряжений оригинального и модифицированного поршня двигателя 1Д 4,5/3,5

Показатели	Средние значения рабочего процесса	Оригинальный поршень	Модифицированный поршень
Максимальное напряжение от давления, МПа	2,555	255,213	266,760
	2,584	258,116	271,500
Максимальная температура, К	966,54	591,671	680,232
	992,57	599,261	692,232
Температура в точке № 1, К	966,54	585,312	574,894
	992,57	592,592	581,594
Температура в точке № 2, К	966,54	578,627	568,629
	992,57	586,660	574,069

гатель 1Д 4,5/3,5, применяемый как стационарный либо в качестве силового агрегата бензиновых инструментов. Оценка теплового состояния как оригинального, так и модифицированного поршня ДВС 1Д 4,5/3,5 методом конечно-элементного анализа позволяет, согласно работе [5, 6], учесть геометрические параметры деталей и особенности распределения тепловой и механической нагрузки при построении максимально приближенной к реальности модели. При данной оценке порядок действий заключается в:

- моделировании рабочего цикла ДВС 1Д 4,5/3,5 для определения характера изменения и численных значений давления и температуры газов в пространстве сжатия;

- создании твердотельной и конечно-элементной модели оригинального и модифицированного поршней;

- выполнение расчетных процедур в программном пакете *SolidWorks Simulation*.

Методика моделирования. Материалами являются алюминиевые сплавы АК4 и АК4 со слоем модифицированным каталитическим материалом. Для упроченного слоя коэффициент теплоемкости и плотность взяты как для оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, как наиболее близкого к получаемому слою материала. Для проведения расчетов в программе *SolidWorks 2022* были созданы твердотельные 3D-модели оригинального поршня и поршня, модифицированного каталитическим материалом. Построение моделей осуществлялось стандартным набором команд, таким как «Бобышка-повернуть», «Вырез-вытянуть», «Вырез-повернуть», «Зеркальное отражение» и т.д., представленном в данном программном продукте. Геометрические размеры моделей соответствовали размеру поршня двигателя 1Д 4,5/3,5. (Диаметр поршня — 45 мм, высота — 38 мм), т.е. построение модели осуществлялось обратным способом, так называемым методом «реверс-инжиниринга» [7].

Модифицированный поршень представлял собой сборку двух деталей, обозначенных как «Поршень» и «Катализатор», путём сопряжений «Совпадение» и «Концентричность». Деталь «Катализатор» представляла собой копию днища оригинального поршня, толщина которой условно была принята равной 35 мкм, как наиболее соответствующая среднему значению толщины оксидированного слоя, имеющего необходимую пористость, значения которого

находятся в пределах 15...50 мкм. Построение данной детали осуществлялось при помощи команды «Бобышка-повернуть». Модели с расчётной сеткой представлены на рис. 1 и 2. Как видно из рис. 1 и 2, поршень представляет собой конечно-элементную модель, состоящую из четырех узловых тетраэдров, которые позволяют наиболее точно передать геометрию, по сравнению с гексаэдрами и пентаэдрами (восьми- и шестиузловыми элементами), также часто применяемыми в расчётных сетках данного программного пакета [7].

Расчеты теплового состояния и статических нагрузок проводились в приложении *SolidWorks Simulation*. Проведенные расчеты основывались на методиках, предложенных в работах [6–11]. Среднецикловые температуры и максимальные давления сгорания в оригинальном и модифицированном ДВС взяты из расчета рабочего процесса, выполненного в программе *RP-TOX 2018 (Process 2018)*, разработанной на кафедре «Инжиниринг силовых установок и транспортных средств» СПбПУ Шаб-

новым А. Ю., Зайцевым А. Б. и Яксон И. А. [12, 13]. Расчет рабочего процесса в данной программе проводится по одной из классических методик, то есть за основу взята термодинамическая модель, называемая «нульмерной» [12], которая имеет ряд допущений, например, о разделении времени рабочего цикла на два участка (постоянной и переменной массы рабочего тела); о квазистационарности и квазиравномерности термодинамических параметров в цилиндре ДВС и идентичности цикловых подач топлива, угла опережения зажигания, а также остальных параметров смесеобразования и топливоподачи для обоих ДВС, сравниваемых в данной работе. Также принято, что температура поршня, стенок цилиндра и головки цилиндра выше на 15...40 К, согласно работам [1, 2, 9, 10]. Наиболее подробно данные допущения описаны в работе [12]. Значения, полученные при моделировании рабочего процесса с указанными допущениями, приведены в табл. 1 и 2 и являются наиболее приближенными к реальным показателям двухтактного ДВС.

При моделировании температурного состояния поршня подвод тепла, теплообмен и прочие факторы задавались граничными условиями на гранях 3D моделей при помощи параметра «Конвекция». Коэффициенты теплоотдачи выбирались согласно справочной литературе [12–14] и согласно которой

для задания граничных условий поршень был разбит на 11 участков для расчёта. Значения температур и коэффициентов конвективной теплоотдачи представлены в табл. 1. Данные значения основываются на теоретических и практических исследованиях, наиболее полно описанных в работе [14], и являются рекомендуемыми при первичном моделировании теплового состояния поршня.

При моделировании термических нагружений для модифицированного поршня также был задан параметр «Тепловое сопротивление» для моделирования термобарьерного участка поршня, образованного методом ПЭО. Тепловое состояние поверхности поршня в данной программе осуществлено методом математического моделирования с применением численного метода конечных элементов на основе общего дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [8, 9], в декартовой системе координат имеющего вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_p}, \quad (1)$$

где общий коэффициент температуропроводности a :

$$a = \frac{\lambda}{c_p}. \quad (2)$$

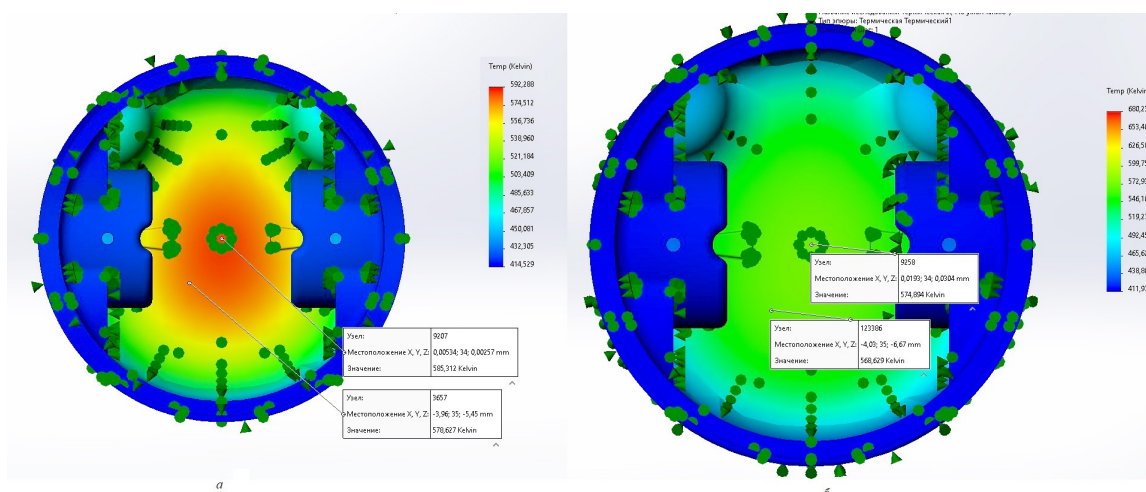


Рис. 3. Распределение температур на внутренней поверхности оригинального (а) и модифицированного(б) поршней при среднецикловой температуре 966,54

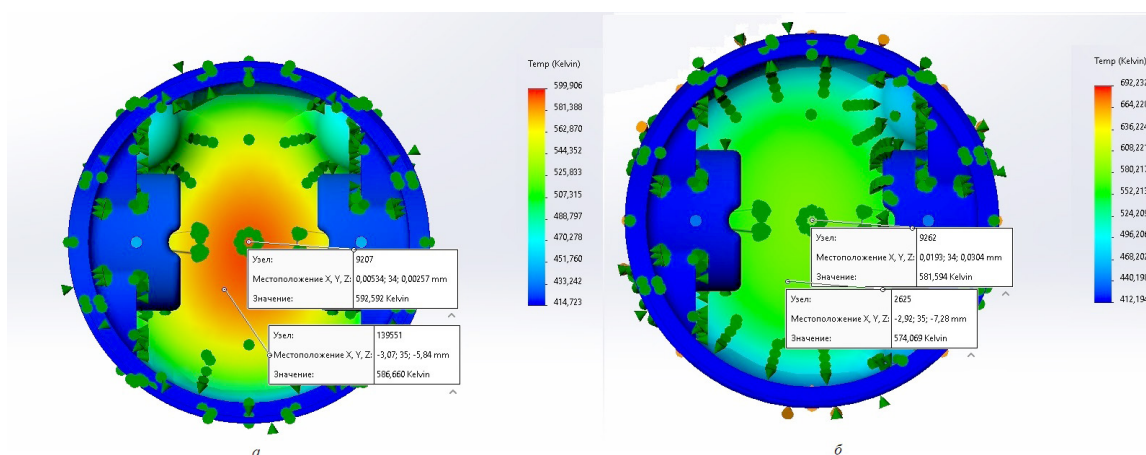


Рис. 4. Распределение температур на внутренней поверхности оригинального (а) и модифицированного (б) поршней при среднецикловой температуре 992,57 К

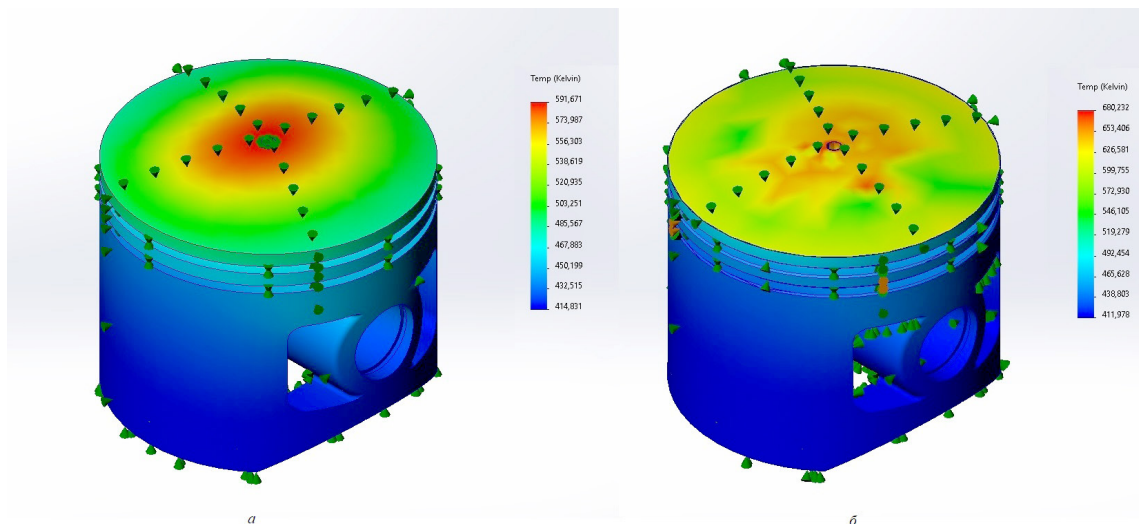


Рис. 5. Распределение температур на днище оригинального (а) и модифицированного (б) поршня при среднецикловой температуре 966,54 К

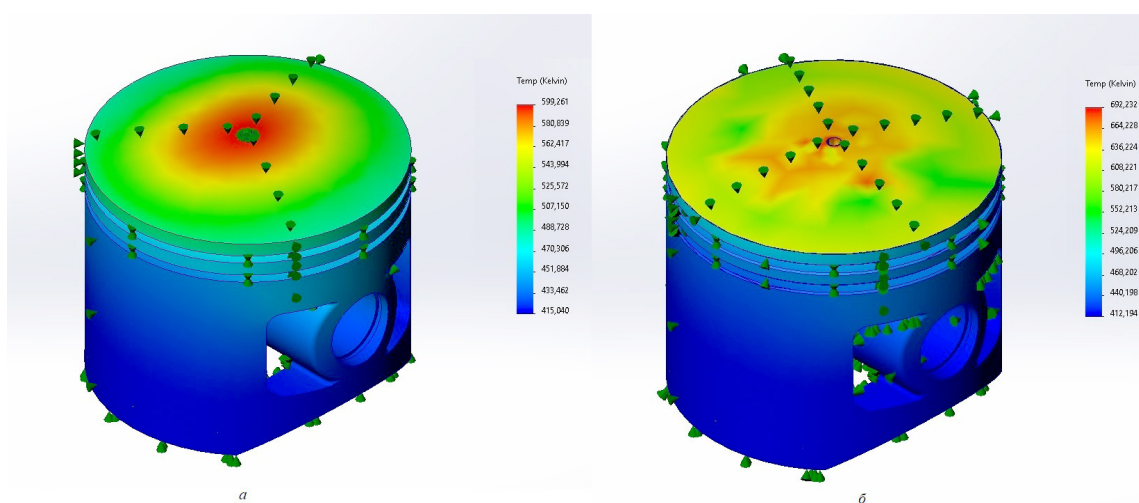


Рис. 6. Распределение температур на днище оригинального (а) и модифицированного поршня при среднецикловой температуре 992,57 К

При моделировании статического нагружения, согласно работе [6], максимальное давление сгорания воздействует на днище поршня. Данное нагружение было рассчитано при инерционной разгрузке с учетом влияния нагрузок на собственные частоты. Из-за превышения максимально допустимых значений в области поршневого пальца способ расчета, указанный в работах [11], то есть при зафиксированной геометрии отверстий поршневого пальца, не применяется. Также, по сравнению с работами [5, 6], при моделировании статического нагружения берется не среднее эффективное давление процесса, а максимальное давление сгорания, позволяющее установить максимальные напряжения, возникающие в теле поршня, хотя и на достаточно короткий промежуток времени.

Поскольку установлено, что при модификации поршня каталитическими материалами в цилиндре ДВС возрастают температура и давление, то целесообразно провести моделирование с указанными значениями температур и давлений для обоих видов поршня и сравнить полученные результаты.

Результаты и их обсуждение. В результате моделирования были получены расчётные сетки, массив распределения напряжений и температур для

оригинального и модифицированного поршней, представленные на рис. 1 и 2. Согласно полученным результатам моделирования, поршень, модифицированный каталитическим материалом, способен выдерживать более высокие температуры. В табл. 2 представлены значения для оригинального и модифицированного поршней при различных температурах и давлении.

Модифицированный слой имеет более высокую температуру, что представлено на рис. 2. Разница максимальных температур составила 100,56 К. Это свидетельствует об улучшении процесса сгорания, что подтверждается также и в работах [1, 3, 15–21]. В то же время внутренняя часть поршня имеет несколько меньшую температуру, что отражено на рис. 2, то есть подтверждаются термобарьерные свойства модифицированного слоя.

При моделировании теплового нагружения в условиях температуры 966,54 К и 992,57 К, то есть рабочего процесса оригинального и модифицированного ДВС разница температур внутренней области поршня на 10,5 К и 11 К соответственно в двух идентичных точках. Результаты данного моделирования представлены на рис. 3 и 4 соответственно. При этом температуры на днище составили 587,77 К

и 640,6 К, т.е. снижение температуры у модифицированного поршня составляет 10,25 %.

При моделировании температурного нагружения днищ поршня заметно, что при среднецикловых температурах оригинального и модифицированного ДВС (рис. 5 и 6) температура днища модифицированного поршня увеличивается максимально до 100 К в отдельных точках. Однако термобарьерное покрытие позволяет выдержать подобное повышение температуры без разрушения и прогорания поршня, что также способствует улучшению процесса сгорания и позволяет осуществить внедрение каталитического материала в пористый слой, полученный методом ПЭО [3, 8]. Сравнение в данном моделировании проводилось как по полученному диапазону температур, так и по двум выбранным точкам в теле поршня. Иные значения в данном случае не требуются, поскольку цветовое распределение позволяет понять примерные значения температуры в указанных областях, поэтому температура в точках приведена по большей части для примера.

При моделировании статического нагружения с инерционной разгрузкой получены значения, представленные на рис. 1 и 2. Согласно данным значениям, модифицированные поршни способны выдерживать большую нагрузку, так как у самой нагруженной его части (т.е. днища) повышены пределы прочности и текучести. Разрушения модифицированного слоя под нагрузкой не происходит. Из-за небольшой разницы давлений сравнительный анализ, аналогичный проведённому с температурами, в данном случае не требуется, поскольку разность суммарных напряжений в данном случае невелика, что также подтверждает предположение об исключении повторного динамического расчёта для модифицированного ДВС [21].

Выводы

1. Упрочнённый слой на днище поршня не приводит к существенному изменению теплового состояния. Концентрация напряжений от статических нагрузок у модифицированного поршня выше, однако находится в пределах, установленных данными материалами, что исключает необходимость нового динамического расчёта ДВС, так как полученные данные будут влиять на кривошипно-шатунный механизм в пределах установленных погрешностей.

2. Средняя температура днища поршня, модифицированного каталитическими материалами, выше, чем у оригинального, в тех же условиях, однако ее распределение более равномерно. Внутренняя часть поршня нагревается менее интенсивно, что снижает вероятность прогара и, при условии наличия термобарьерного слоя и последующей пропитки катализатором, даёт широкий спектр применения данных поршней на двухтактных ДВС, а в перспективе возможность проведения исследования на четырёхтактном ДВС.

3. Наличие термобарьерного слоя позволяет поршню выдерживать высокие температуры, что является дополнительным плюсом для внедрения каталитических материалов, активность которых может наблюдаться при высокой температуре.

4. Поршни, модифицированные каталитическими материалами, способны выдерживать большие давления без значимой деформации и разрушения поверхности. Модифицированный слой не разрушается и не отделяется при работе ДВС. С учётом наличия каталитического материала на днище поршня также происходит улучшение процесса

сгорания и повышение температуры в камере сгорания, отсюда следует, что моделирование температурных и статических напряжений в программе *SolidWorks Simulation* показало возможность применения поршня, модифицированного каталитическими материалами, в условиях работы реального двигателя.

Библиографический список

1. Borisov V. A., Sigaeva S. S., Anoshkina E. A., Ivanov A. L., Litvinov P. V., Vedruchenko V. R., Temerev V. L., Arbutov A. B., Kuznetsov A. A., Mukhin V. A., Suprunov G. I., Chumychko I. A., Shlyapin D. A., Tsyrl'nikov P. G. Plasma electrolytic oxide coatings on silumin for oxidation CO // Oil and gas engineering (OGE-2017). AIP Conference Proceedings. 020001. 2017. Vol. 1876. DOI: 10.1063/1.4998821.
2. Osipov A. R., Borisov V. A., Suprunov G. I., Mukhin V. A., Ivanov A. L., Sigaeva S. S., Anoshkina E. A., Temerev V. L., Hohlov A. A., Tsyrl'nikov P. G. Catalytic coatings for improving the environmental safety of internal combustion engines // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.626.
3. S. Narasima Kumar. Experimental investigation of two stroke copper coated spark ignition engine with gasoline and gasohol // International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE). 2014. Vol. 2, Issue 5. P. 1–7.
4. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Анализ путей образования вредных веществ в отработавших газах поршневых двигателей // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 36–39.
5. Ломакин Г. В., Мацулевич М. А. Методика оценки граничных условий при решении задачи определения теплового состояния поршня бензинового двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2014. Т. 14, № 1. С. 26–32.
6. Мацулевич М. А., Ломакина Н. М., Ломакин Г. В. Оценка тепломеханической нагруженности поршня бензинового двигателя при форсировании газотурбинным наддувом // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 78–80. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-78-80.
7. Гоц А. Н., Клевцов В. С. Методика расчета теплового и напряженно-деформированного состояния головки цилиндра транспортного дизеля жидкостного охлаждения // Известия МГТУ МАМИ. 2019. № 1 (39). С. 2–7. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-39-1-2-7.
8. Ломакин Г. В. Методика оценки граничных условий при решении задачи определения теплового состояния поршня двигателя 4Ч 8,2/7,56 // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й науч. конф. / Отв. С. Д. Ваулин. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. С. 314–322.
9. Дударева Н. Ю., Прокофьева М. А. Исследование влияния керамического покрытия на тепловое состояние гильзы цилиндра // Двигателестроение. 2021. № 3 (285). С. 3–6.
10. Кавтарадзе Р. З., Онищенко Д. О., Зеленцов А. А., Кадиров С. М., Арипджанов М. М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № 4 (85). С. 83–102.
11. Бирюк В. В., Горшкалев А. А., Каюков С. С., Сайгаков Е. А. Расчёт на прочность элементов ДВС с помощью ANSYS с учётом тепловых процессов в камере сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 2. С. 35–43. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43.
12. Галышев Ю. В., Зайцев А. Б., Костин А. И., Шабанов А. Ю. Теория рабочих процессов в ДВС. Расчет рабочего цикла и

газообмена в ДВС. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 196 с.

13. Гальшев Ю. В., Зайцев А. Б., Шабанов А. Ю. [и др.]. Программа расчета рабочих процессов и токсичности отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2019. № 2019618634 от 06.06.2019.

14. Вырубов Д. Н., Иващенко Н. А., Ивин В. И. [и др.]. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. Москва: Машиностроение, 1983. 372 с.

15. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Влияние материала поршня на процесс сгорания топлива в двигателе // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 5 (51). С. 61–68.

16. Zeng W., Xie M. A novel approach to reduce hydrocarbon emissions from the HCCI engine // Chemical engineering journal. 2008. Vol. 139, Issue 2. P. 380–389.

17. Parlak A., Yaşar H., Şahin B. Performance And Exhaust Emission Characteristics Of A Lower Compression Ratio LHR Diesel Engine // Energy Conversion and Management. 2003. Vol. 44. P. 163–175.

18. Ivanov A. L., Zubarev K. V., Litvinov P. V., Gavrilov L. V., Borisov V. A. The increase of ecological safety of internal combustion engines by using catalytic additives to fuel // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007 (1). 020011. DOI: 10.1063/1.5051850.

19. Литвинов П. В., Борисов В. А., Коцюба Я. В., Грязнова З. Н., Ведрученко В. Р. Минимизация количества опытов для сравнения уровня выбросов вредных веществ при эксплуатации оригинального и модифицированного двигателей внутреннего сгорания // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: Изд-во ОмГУ, 2022. С. 133–140.

20. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. Исследование влияния искрового упрочнения на прочностные свойства алюминиевого сплава // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 8 (53). P. 23–28.

21. Dudareva N. Y., Kalschikov R. V., Butusov I. A., 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 // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, № 5. P. 5–8. DOI: 10.25103/jestr.075.02.

ЛИТВИНОВ Павел Васильевич, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного уни-

верситета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск; инженер-конструктор конструкторского отдела ООО «Моментум», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 6686-8625

AuthorID (РИНЦ): 873778

Адрес для переписки: p_vasilich55@mail.ru

БОРИСОВ Вадим Андреевич, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и химическая технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9750-2492

AuthorID (РИНЦ): 684828

ORCID: 0000-0001-6289-8029

AuthorID (SCOPUS): 48760915400

ResearcherID: F-2813-2017

Адрес для переписки: borisovtiger86@mail.ru

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1462-4926

AuthorID (РИНЦ): 514202

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

ГРЯЗНОВА Зарина Николаевна, студентка гр. ХТ-191 нефтехимического института ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9401-1140

AuthorID (РИНЦ): 1153656

Адрес для переписки: zarina.gryaznova.01@mail.ru

КОЦЮБА Ян Владимирович, инженер-конструктор конструкторского отдела ООО «Моментум», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1103-6040

AuthorID (РИНЦ): 1159391

Адрес для переписки: iankotsiuba@gmail.com

Для цитирования

Литвинов П. В., Борисов В. А., Ведрученко В. Р., Грязнова З. Н., Коцюба Я. В. Моделирование статических и термических нагрузок поршня двухтактного двигателя, модифицированного каталитическими материалами // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-46-52.

Статья поступила в редакцию 07.09.2022 г.

© П. В. Литвинов, В. А. Борисов, В. Р. Ведрученко,

З. Н. Грязнова, Я. В. Коцюба