

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЯ ДВС С КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ ДНИЩА

Дойников А.И., Дударева Н.Ю.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Ключевые слова: поршень, покрытие, двигатель внутреннего сгорания, термонапряжённое состояние, конечно-элементный анализ, алюминиевые поршневые сплавы, тепловой расчёт.

Аннотация. Представлена методика конечно-элементного моделирования термонапряжённого состояния поршня двигателя внутреннего сгорания с керамическим покрытием на днище в программе Autodesk Fusion 360. Расчёт реализуется в два этапа: стационарный тепловой анализ и последующий термоупругий прочностной анализ. Толщина покрытия варьировалась в диапазоне 100-300 мкм. Разработана система граничных условий и критерии сходимости конечно-элементной сетки.

DETERMINATION OF THE THERMAL STRESS STATE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTON WITH A CERAMIC BOTTOM COATING

Doinikov A.I., Dudareva N.Yu.

Ufa University of Science and Technology, Ufa

Keywords: piston, coating, internal combustion engine, thermomechanical stress, finite element analysis, aluminum piston alloys, thermal calculation.

Abstract. A finite element methodology for modeling the thermomechanical stress state of a ceramic-coated internal combustion engine piston in Autodesk Fusion 360 is presented. Two sequential stages are implemented: steady-state thermal analysis and thermoelastic structural analysis. The coating thickness varied in the range of 100-300 μm . A system of boundary conditions and mesh convergence criteria are developed.

Введение. Поршни ДВС работают в условиях интенсивного термосилового нагружения: температура газов, воздействующих на днище, составляет 1000-1200°C, давление – МПа. Керамические покрытия, формируемые, например, методом микродугового оксидирования (МДО), способны обеспечить теплозащитный и противоизносный эффект [1]. Анализ литературы показал, что методика исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) поршня, представленная в литературе, имеет ряд недостатков: не учитывает комплексное воздействие температуры и механических нагрузок, имеет малое количество точек зондирования напряжений, деформаций и температур [1]. Поэтому цель настоящей работы – разработка методики конечно-элементного моделирования термонапряжённого состояния поршня двигателя с керамическим покрытием на днище.

Методика конечно-элементного расчёта. В качестве объекта исследования выбран поршень двухтактного двигателя РМЗ-551i с диаметром 76 мм. Расчётная модель включает два тела: поршень и покрытие на поверхности его днища; толщина покрытия $\delta = 100, 200$ или 300 мкм. Задаются свойства материала поршня при различных температурах [2, 3]. Теплофизические и механические свойства МДО-покрытия приняты по [4].

Расчёт проводится в два этапа: I этап – это температурный анализ (определяется поле $T(x, y, z)$); II этап – это статический прочностной анализ в термоупругой постановке. Нулевой отсчёт деформаций осуществляется при 20°C. Тепловые граничные условия представлены коэффициентами теплоотдачи α и температурами среды T для каждой зоны поверхности поршня. Значения рассчитываются по формуле Вошни [5] и приведены в таблице 1.

Табл. 1. Граничные условия теплового расчёта поршня РМЗ-551i [1]

Зона / поверхность поршня	Коэффициент теплоотдачи, α , Вт/(м ² ·К)	Температура среды, T , °С
Днище (камера сгорания)	592	1140
Огневой пояс	148	1140
Юбка поршня	1 485	200
Нижняя поверхность (со стороны картера)	174	90
Боковая поверхность канавки кольца	116 009	300
Верхний торец канавки кольца	1 818	150
Нижний торец канавки кольца	97	—

Для сравнения температурных полей во всех вариантах расчёта определены 5 контрольных групп зондов (рис. 1): 1 группа – центральная область днища; 2 – периферия днища; 3 – огневой пояс; 4 – юбка поршня; 5 – нижняя поверхность со стороны картера.

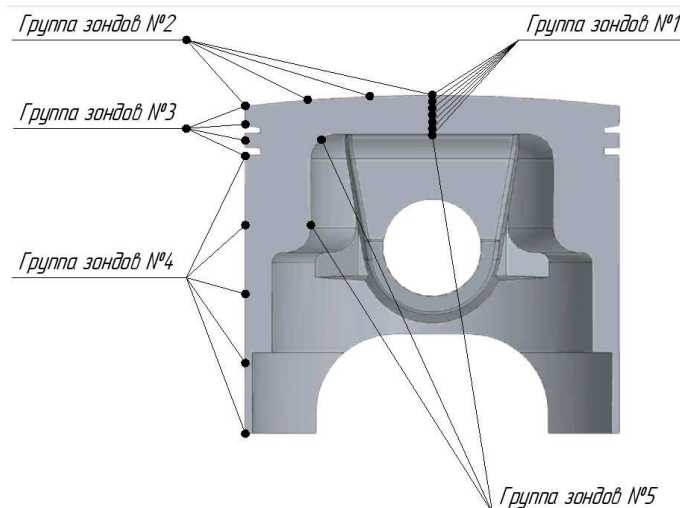


Рис. 1. Группы контрольных зондов: 1 – центральная область днища; 2 – периферия; 3 – огневой пояс; 4 – юбка; 5 – нижняя поверхность

Механические граничные условия представлены давлением газов: P_z на поверхность днища, $0,60 \cdot P_z$ – в первой канавке, $0,30 \cdot P_z$ – во второй канавке [6]; цилиндрическая опора задается в отверстии под поршневой палец. Сетка конечных элементов представляет собой тетраэдральные элементы II порядка. В слое покрытия должно быть не менее четырёх элементов по толщине. В зонах

концентрации напряжений (донно-боковое сопряжение, канавки колец) применяется локальное измельчение сетки. Критерием сходимости является условие: двукратное измельчение элементов в зоне покрытия не должно изменять максимальную температуру поверхности металла более чем на 1% и напряжения по Мизесу – более чем на 2%. На границе «покрытие–поршень» – задаются условия идеального контакта (непрерывность T и перемещений) ввиду диффузионного срачивания МДО с металлом [4].

Заключение. Разработана методика конечно-элементного моделирования НДС поршня ДВС с МДО-покрытием в Autodesk Fusion 360. Определены этапы расчёта, система граничных условий, схема точек зондирования, критерии сходимости сетки, условие идеального контакта. Применение методики позволит оценить влияние керамического покрытия на НДС поршней ДВС.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания №FRRR-2026-0006 (УУНиТ).

Список литературы

1. 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, vol. 224, p. 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201822403008.
2. Машиностроение: Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Т. II-3 / Под ред. И.Н. Фридляндера, О.Г. Сенаторова. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
3. MАНLE GmbH. Pistons and engine testing. 2nd ed. Stuttgart: Springer Vieweg, 2016. 305 p.
4. Curran J.A. Thermal and Mechanical Properties of Plasma Electrolytic Oxide Coatings: PhD thesis. – Cambridge: University of Cambridge, 2005. – 174 p.
5. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 592 с.
6. Устинов А.Н. Исследование поршневых колец дизелей / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Саратов. политехн. ин-т. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. – 126 с.

Сведения об авторах:

Дойников Антон Игоревич – инженер, аспирант кафедры ДВС;
Дударева Наталья Юрьевна – д.т.н., профессор кафедры ДВС.