

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСА ПОРШНЯ ДВС С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ЕГО ЮБКЕ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Дударева Н.Ю.¹, Дойников А.И.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, dudareva.nyu@ugatu.su

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, поршень, юбка поршня, покрытие, микродуговое оксидирование, моделирование, интенсивность изнашивания

Обеспечение надёжности и долговечности деталей и узлов является актуальной проблемой производителей двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Анализ литературы показывает, что основной причиной отказов современных поршневых ДВС является не поломка деталей, а их износ. Для решения этой проблемы активно используют различные технологические методы защиты поверхностей, такие как азотирование, хромирование, нанесение покрытий типа Nikasil и др. [1]. Однако несмотря на применение прогрессивных технологий и материалов, проблема износа деталей остается актуальной. Особенно остро эта проблема стоит для деталей, производимых из алюминиевых сплавов, которые уступают сталям и чугунам по твёрдости и износостойкости, но при этом обеспечивают низкую массу ДВС. Наиболее часто из алюминиевых сплавов изготавливают поршни ДВС, которые кроме износа, испытывают высокое давление и температуру горячих газов камеры сгорания [2]. Перспективной и активно развивающейся технологией защиты деталей из алюминиевых сплавов от износа является микродуговое оксидирование (МДО). Покрытия, формируемые этим методом, являются керамическими, характеризуются низкой теплопроводностью (0,5–5,5 Вт/(м·К)) и высокой микротвёрдостью (до 22 ГПа), что позволяет многократно повысить износостойкость деталей двигателя [3].

В процессе проектирования деталей важно иметь возможность адекватно спрогнозировать износ поверхностей, поскольку это позволит сократить временные и материальные затраты при выборе технологических приемов и режимов при изготовлении деталей. Анализ научной литературы показал, что математические модели, позволяющие спрогнозировать износ юбки поршня, учитывающие свойства МДО-покрытий, отсутствуют. Поэтому целью работы является разработка прогнозной модели износа юбки поршня, которая учитывает свойства и характеристики МДО-покрытий.

Для разработки математической модели сначала был проведен анализ факторов, которые оказывают влияние на износ юбки поршня. Из комплекса выделенных факторов для разработки математической модели использовались только независимые факторы, а именно: относительная скорость поршня; боковая сила; вязкость смазочного материала; твердость и шероховатость поверхности гильзы; шероховатость, микротвердость, и пористость покрытия; радиус скругления вершин поверхности покрытия.

Для разработки искомой математической модели была использована π -теорема Букингема, основываясь на которой любой физический закон можно выразить в виде уравнения, содержащего исключительно безразмерные комбинации переменных [4]. После комплекса преобразований уравнение интенсивности изнашивания юбки поршня (I) было представлено в виде функции:

$$I = C \cdot \left(\frac{H}{P}\right)^{z_4} \left(\frac{v_{\Pi} \cdot \eta}{Ra \cdot P}\right)^{z_5} \left(\frac{\rho}{Ra}\right)^{z_6} \left(\frac{Ra_{\Gamma}}{Ra}\right)^{z_7} \left(\frac{H_{\Gamma}}{P}\right)^{z_8} \cdot e^{z_9}, \quad (1)$$

где v_{Π} – относительная скорость поршня, м/с; P – боковая сила, действующая на юбку поршня, Н; Ra – шероховатость поверхности поршня, мкм; H – микротвердость поверхности поршня (покрытия), Па; e – пористости покрытия; η – вязкость смазочного материала, Па · с; ρ – радиус скругления вершин поверхности поршня, мкм; H_{Γ} – твердость

поверхности гильзы, Па; Ra_{Γ} – шероховатость поверхности гильзы, мкм; z_i – показатели степени.

Далее была выполнена идентификация уравнения (1) с целью определения значения постоянной C и степенных коэффициентов z_i . Идентификация выполнялась на основе известных экспериментальных данных и исследования свойств и структуры МДО-покрытия. Итоговая математическая модель получила вид:

$$I = 1,01 \cdot \left(\frac{P^2}{H \cdot e \cdot H_{\Gamma}} \right) \left(\frac{v_{\Pi} \cdot \eta}{Ra \cdot P} \right)^{0,58} \left(\frac{Ra_{\Gamma} \cdot \rho}{Ra^2} \right). \quad (2)$$

Сравнение экспериментального значения интенсивности изнашивания юбки с МДО-покрытием и рассчитанному по уравнению (2) показало, что разница между этими значениями составляет 12,4%.

Результаты работы могут быть использованы в практике двигателестроения при проектировании поршней и разработке технологии их изготовления.

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

Список литературы

1. Goodman, J. Nikasil and Alusil // Engine Professional. – 2008. oct-dec. – P. 18-22.
2. Белов В.П., Апелинский Д.В., Беженарь В.Н. Экспериментальная оценка температурного состояния поршней тракторных дизелей // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 2. – С. 111–120.
3. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х томах. – Т. 2. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.
4. Laskowski R.M. The application of the Buckingham Π theorem to modeling high-pressure regenerative heat exchangers in off-design operation // Journal of Power Technologies. – 2011. – № 91 (4). – P. 198-205.

Сведения об авторах

Дударева Наталья Юрьевна – доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания, область научных интересов: многофункциональные покрытия деталей двигателей;

Дойников Антон Игоревич – аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания, инженер. Область научных интересов: повышение надежности поршней двигателей.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF PISTON WEAR IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE, TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE COATING SHAPED ON ITS SKIRT BY THE MICROARC OXIDATION METHOD

Dudareva N.Y., Doynikov A.I.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, dudareva.nyu@ugatu.su

Keywords: internal combustion engine, piston, piston skirt, coating, microarc oxidation, modeling, wear intensity

A predictive mathematical model is presented, describing the wear intensity of the piston skirt of an internal combustion engine with a coating formed using microarc oxidation technology. The mathematical model is based on the π -theorem of Buckingham and takes into account a complex of various factors. The evaluation showed a discrepancy of 12.4% between the calculated values based on the model and the experimental values.