

2. Sinyakov G.N., Panov I.M. Theory and calculation of soil-cultivating machines.- М.: Mechanical Engineering, 1977. - 328 p.
3. Gorobey V.P. Study of the parameters of the gear disc opener for planter selection // Tractors and agricultural cars. - 2014. - №10. - P. 36-38.
4. Bendat J. Applications of correlation and spectral analysis / J.Bendat, A. Piersol. – Trans. by Eng. – М.: World, 1983. - 312 p.

УДК 621.43

<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2019-2-93-96>

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Жуков А.А.

*Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск*

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), днище поршня, толщина днища, диаметр поршня, максимально допустимая температура нагрева, термические напряжения, трещиностойкость, критический размер трещины, синергетические критерии разрушения, работоспособность поршня.

Аннотация. Рассматривается возможность комплексной оценки работоспособности поршней двигателей внутреннего сгорания на основе анализа термонапряженного состояния днища поршня, трещиностойкости материала и синергетических критериев разрушения.

Значительное увеличение находящихся в эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) обуславливает необходимость ужесточения допустимых норм выброса в атмосферу вредных веществ и отработавших газов. Это регламентируется международными документами: Правила ЕЭК ООН Euro – 1 (1993 г.), Euro – 2 (1996 г.), Euro – 3 (1999 г.), Euro – 4 (2005 г.), Euro – 5 (2009 г.). Для обеспечения установленных нормативов используются нейтрализаторы, фиксаторы, дожигатели отходящих газов. Наиболее эффективным направлением является повышение эффективности процессов подачи и сгорания топлива за счет увеличения давления впрыска топлива до 120...150 МПа. Это приводит к ужесточению условий эксплуатации поршней ДВС, работоспособность которых в значительной степени определяет надежность работы двигателя в целом.

В данной работе предложена методика оценки работоспособности поршней ДВС, изготавливаемых из алюминиевых сплавов и чугуна. Отличительной особенностью предлагаемой методики является то, что наряду с традиционной оценкой термонапряженного состояния днища поршня [1] впервые использованы критерии трещиностойкости [2] и синергетики [3].

Анализ литературных данных показал, что для изготовления поршней высоко-оборотистых автомобильных ДВС с числом оборотов $n = 3500...5500$ об/мин используются алюминиевые сплавы следующих марок АК8МЗ, АК12ММГН, АК21М2Н2,5. Химический состав и механические свойства этих сплавов регламентированы ГОСТ 1583-93.

Для изготовления поршней низко- и средне-оборотистых ДВС $n = 1000...3000$ об/мин с повышенной тепловой нагрузкой целесообразно

использовать серые и высокопрочные чугуны соответствующих марок согласно ГОСТ 1412-85 или ГОСТ 7293-85.

Так как днище поршня является наиболее нагруженным элементом поршня, поэтому необходимо правильно определить требуемую толщину днища с учетом эксплуатационных особенностей и свойств материала.

В результате анализа конструкции поршней из алюминиевых сплавов для 19-ти различных ДВС мощностью (N) от 5,0 до 810 кВт и с числом оборотов (n) от 1600 до 5700 об/мин, выявлена статистически значимая корреляционная взаимосвязь толщины днища поршня – δ от диаметра поршня – D и от удельной мощности $N_{уд} = N / D$:

$$\delta = 0,105D - 0,354, (r = 0,76), \quad (1)$$

$$\delta = 115,5N_{уд}^{0,33}, (r = 0,82). \quad (2)$$

Так как при работе ДВС определенная часть теплоты от сгорания поглощается днищем поршня, поэтому, используя формулы $Q = CMt_n$ и

$M = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \delta \cdot \rho$, получено следующее выражение для расчета толщины днища поршня:

$$\delta = \frac{4Q}{\pi D^2 \cdot \rho \cdot C \cdot t_n}, \quad (3)$$

где Q – количество поглощенного тепла, [кДж]; D – диаметр поршня, [м]; ρ – плотность материала, [кг/м³]; C – теплоемкость материала, [Дж/м³·°C]; t_n – максимально допустимая температура нагрева днища поршня, [°C].

Необходимо отметить, что максимально допустимая температура нагрева днища поршня не должна превышать температуру перехода материала в пластическое состояние, которую можно определить по выражению:

$$t_{пл} = \frac{2\sigma_{02}(1-\mu)}{\alpha E}, \quad (4)$$

где σ_{02} – условный предел текучести материала, [МПа]; $\mu = 0,33$ – коэффициент Пуассона; α – тепловой коэффициент линейного расширения, [1/°C]; E – модуль упругости Юнга, [МПа].

Расчеты, выполненные по выражению (4), показывают, что температура перехода в пластическое состояние, т. е. максимально допустимая температура нагрева составляет: для алюминиевых сплавов (220...250) °C, для высокопрочных чугунов (350...425) °C, что согласуется с литературными данными [1].

Для оценки термонапряженного состояния днища поршня необходимо рассчитать величину осевых термических напряжений – σ_1 , возникающих в результате температурного градиента по толщине днища, а также величину радиальных напряжений – σ_2 , возникающих вследствие затрудненной тепловой деформации растяжения-сжатия при циклических нагревах и охлаждениях. Величины указанных напряжений рассчитываются по следующим выражениям:

$$\sigma_1 = \frac{\alpha E}{2(1-\mu)} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{\alpha E \cdot (t_u - t_k)}{2(1 - \mu)}. \quad (6)$$

В выражении (5) Δt – температурный градиент по толщине днища поршня, его можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t = q\delta/\lambda, \quad (7)$$

где q – удельная теплonaпряженность, [ккал/м²·ч]; λ – теплопроводность материала, [ккал/м·ч·°C].

В выражении (6) t_u – температура в центре днища поршня, $t_u = t_n \approx t_{nl}$; t_k – температура наружного диаметра днища поршня. Для определения разности температур $(t_u - t_k)$ в работе [1] рекомендовано выражение:

$$(t_u - t_k) = qR^2/(4\delta\lambda), \quad (8)$$

где R – наружный радиус поршня, [м].

По величине суммарных напряжений $(\sigma_1 + \sigma_2)$ выбирают марку сплава с соответствующим уровнем σ_B и σ_{02} .

Работоспособность многих деталей, работающих в условиях циклических знакопеременных нагрузок, обеспечивается за счет трещиностойкости материала. Показателем трещиностойкости материалов является коэффициент вязкости разрушения – K_{1C} , [МПа·м^{0,5}], который характеризует способность материала сопротивляться развитию, росту трещины.

Зная значение K_{1C} и величину действующих напряжений $\sigma^* \approx (\sigma_1 + \sigma_2)$, можно рассчитать критическую длину трещины – l_{kp} , дальнейшее развитие которой невозможно. Для этого используется следующее выражение [2]:

$$l_{kp} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_{1C}}{\sqrt{\sigma^* \cdot Y}} \right], \quad (9)$$

где Y – безразмерный коэффициент, который учитывает толщину и форму изделия, для пластин $Y = (1,15 \dots 1,25)$.

Для комплексной оценки энергетического состояния и работоспособности материалов в работе [3] предложены следующие синергетические критерии:

$$\text{- критерий энергоемкости } K_1 = \frac{1}{2}(\sigma_T + \sigma^*_B) \cdot \varepsilon; \quad (10)$$

$$\text{- критерий зарождения трещины } K_2 = \frac{K_1}{\sigma_T}; \quad (11)$$

$$\text{- критерий развития трещины } K_3 = K_1 \cdot \sigma_T; \quad (12)$$

$$\text{- критерий хрупкости } K_4 = \frac{K_3^2}{K_2 \cdot \sigma_T}. \quad (13)$$

В критерии K_1 используются истинный предел прочности – σ^*_B и предельная деформация $\varepsilon = \ln[1/(1 - \psi)]$, ψ – относительное сужение площади поперечного сечения образца при растяжении.

Используя приведенные в статье формулы был выполнен расчет показателей работоспособности поршней дизельного двигателя автомобиля ЗИЛ 502 ($N = 110$ кВт, $D_n = 105$ мм, $n = 3200$ об/мин), предполагаемый материал

поршней чугуна ВЧ60 и алюминиевый сплав АК12ММгН. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Показатели работоспособности

№	Наименование и обозначение показателя	ВЧ60	АК12ММгН
1	Толщина днища δ , мм	7,0	12,5
2	Максимально допустимая температура нагрева t_n , °C	755	337
3	Суммарные термические напряжения $(\sigma_1 + \sigma_2)$, МПа	410	205
4	Максимально допустимый размер трещины $l_{кр}$, мм	2,4	5,3
5	Критерий энергоемкости K_1	77,5	93,0
6	Критерий зарождения трещины K_2	0,20	0,35
7	Критерий развития трещины K_3	18500	20300
8	Критерий хрупкости K_4	238	220

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее работоспособным материалом является сплав АК12ММгН. Высокопрочный чугун марки ВЧ60 не пригоден, т.к. предел прочности σ_B ниже величины термических напряжений – 755 МПа. Для изготовления поршней можно использовать чугун ВЧ80.

Список литературы

1. Дьяченко Н.Х., Харитонов Б.А., Петров В.М. и др. Конструирование и расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебник. – Л.: Машиностроение, 1979. – 392 с.
2. Чугун. Справочник / под ред. Шермана А.Д. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
3. Скуднов В.А. Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении. – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – 191 с.

Сведения об авторе:

Жуков Анатолий Алексеевич – к.т.н., профессор, профессор кафедры «Материаловедение, литьё, сварка», РГТУ им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск.

THE QUESTION OF EVALUATION OF EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTONS

Zhukov A.A.

Keywords: internal combustion engine (ice), piston, piston diameter bottom thickness, the maximum allowable temperature, thermal stress, fracture toughness, the critical crack size, synergistic criteria, that the destruction of the piston.

Abstract. Examines the possibility of a comprehensive health evaluation of piston internal-combustion engines on the basis of an analysis of the thermostressed State of crack resistance of piston bottoms and synergistic material criteria of destruction.

References

1. Dyachenko N.Kh., Kharitonov B.A., Petrov V.M. and others. Design and calculation of internal combustion engines: Tutorial. – L.: Engineering, 1979. – 392 p.
2. Castiron. Guide / ed. Sherman A.D. – M.: Metallurgy, 1991. – 576 p.
3. Skudnov V.A. Synergetics phenomena and processes in metallovedenii, strengthening technology and destruction. – N. Novgorod: NSTU, 2007. – 191 p.