

Поддубный И.Н.,*
Кубич В.И.,**
Коробочка А.Н. *

*Днепропетровский государственный
 технический университет,
 **Запорожский национальный
 технический университет,
 E-mail: reibung1@mail.ru

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УПРОЧНЕННОЙ ФАСКИ КЛАПАНА И ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ "ФАСКА КЛАПАНА - СЕДЛО"

УДК 620.178.16: 621.815

В работе предложено определение пути трения для сопряжения "фаска клапана - седло" с учетом вертикального перемещения контакта по спирали при закрытии клапана и его горизонтального вращения по окружности при открытии за счет работы механизма принудительного вращения за n - е количество циклов за время работы.

Разработано новую технологию поверхностного упрочнения деталей механизмов и систем двигателя внутреннего сгорания.

В результате обработки данных по параметрам нагружения, геометрическим размерам клапанов, контрольного взвешивания после каждого временного показателя испытаний, определены расчетным путем линейные износы фасок, что позволило рассчитать интенсивности изнашивания и их износостойкость.

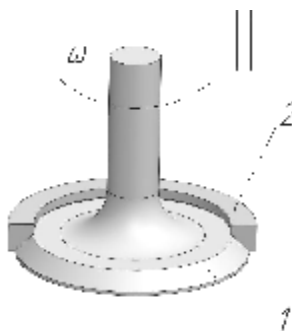
Полученную систему уравнений решали методом Крамера. Разработано математическое описание износостойкости упрочненной поверхности фаски клапана двигателя внутреннего сгорания от параметров контактного взаимодействия с учетом ее изнашивания на интегрированном двумя перемещениями пути трения.

Ключевые слова: износостойкость, контактное взаимодействие, поверхность, испытания, диаграмма.

Постановка проблемы

Экспериментальная оценка контактного взаимодействия элементов трибосопряжений позволяет определять не только их триботехнические характеристики, но и установить функциональную взаимосвязь между ними и параметрами исследуемого процесса. При этом совместный учет влияния изменения физико-механических и геометрических характеристик изнашиваемых поверхностей и параметров, определяющих условия трения, позволяет прогнозировать трибологическое состояние узла трения в целом. Особенно значимо математическое выражение, в котором учитывается характер сложного динамического нагружения рабочих поверхностей, поскольку построенные с его помощью пространственные диаграммы будут более полно отображать картину изменения изучаемой характеристики, например, износостойкости. Износостойкость сопряжения и его деталей (материалов) является комплексным и наиболее универсальным показателем его триботехнического качества [1]. Особенно это важно, если речь идет о разработках новых технологий поверхностного упрочнения деталей механизмов и систем двигателя внутреннего сгорания (ДВС), определяющих его надежность в целом [2].

Трибосопряжение "фаска клапана - седло" (рис. 1) газораспределительного механизма ДВС является одним из узлов трения, обуславливающим характер протекания термодинамических процессов в цилиндре, определяющим значения мощностных, экономических показатели его работы и ресурса в целом. В процессе работы клапанной группы отдельно выделенный микрогеометрический фрагмент профиля фаски клапана совершает сложное нагруженное перемещение по поверхности неподвижного седла, а именно удар с проскальзыванием, происходящем от вибрации в механизме газораспределения ДВС. Описанный процесс сопровождается изнашиванием материалов на пути трения с учетом коррозионной и эрозийной составляющей процесса.



**Рис. 1 – Трибосопряжение "фаска клапана – седло"
 в момент контактного взаимодействия:
 1 – клапан;
 2 – седло (фрагмент)**

В этом трибосопряжении путь трения определяется с учетом вертикального перемещения контакта по спирали при закрытии клапана и его горизонтального вращения по окружности при открытии за счет работы механизма принудительного вращения за n - е количество циклов за время работы. В качестве цикла можно считать время одного проворота клапана вокруг своей оси [3].

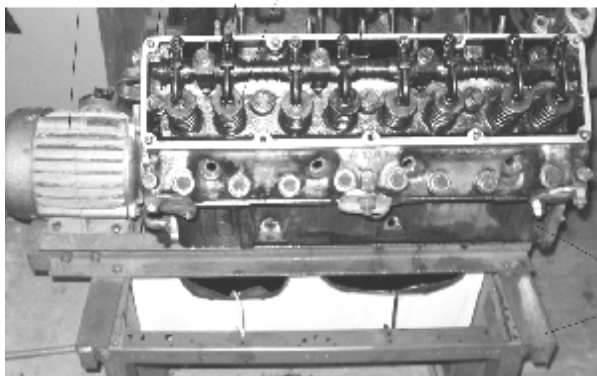


Рис. 2 – Внешний вид установки для проведения испытаний натуральных образцов - клапанов:

- 1 – основание; 2 – блок цилиндров;
3 – электродвигатель привода;
4 – корпус головки блока цилиндров; 5 – коромысло;
6 – тарелка клапана; 7 – пружина клапана

В ранее проведенных исследованиях [4, 5] установлено, что применение разработанной упрочняющей технологии модифицирования поверхности фаски клапана лучом лазера позволяет увеличить ее износостойкость на 40 - 50 %. При этом испытания проводились с целью оптимизации следующих режимов: плотности мощности лазерного излучения, длительности импульса и коэффициента зон перекрытия. Последующие же контрольные испытания образцов – клапанов с фасками, обработанными по заявленной технологии [6] проводились в лабораторных условиях на уста-

новке (рис. 2) [7] при параметрах нагружения, соответствующих эксплуатационным режимам работы двигателя ЗИЛ – 508:

- линейная скорость перемещения клапана $V = 0,6 - 0,8$ м/с;
- угловая скорость вращения клапана (при действии механизма проворота) $\omega = 0,15 - 0,12$ рад/с;
- давление в зоне трения $p = 113$ МПа;
- время испытаний $t_1 - t_6$.

Однако, до настоящего времени определению пути трения в трибосопряжении "фаска клапана - седло" с учетом приведенных перемещений внимание не уделялось (рис. 3).

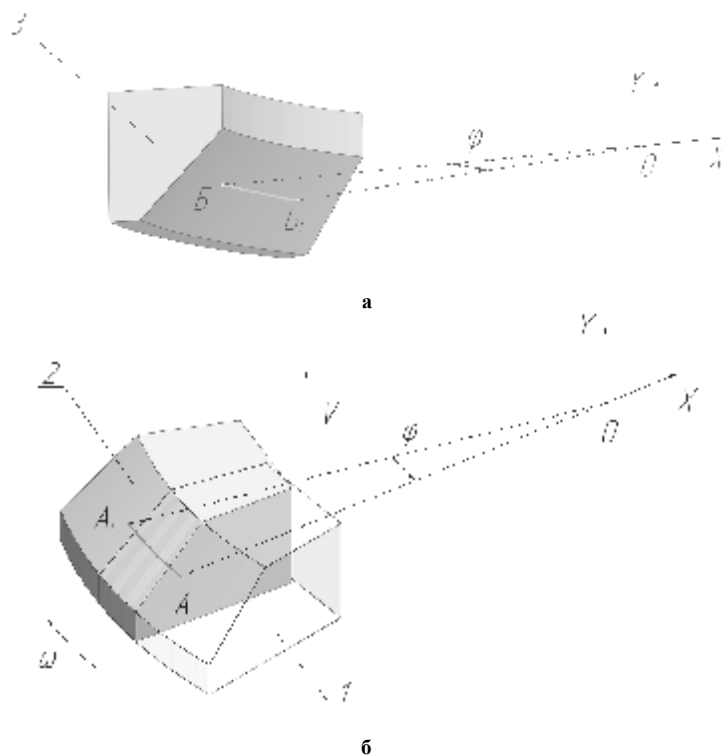


Рис. 3 – Схема контактного взаимодействия трибосопряжения "фаска клапана - седло":

а – положение седла; б – перемещений фрагмента фаски клапана по седлу;

1 – положение фаски в момент соударения с седлом;

2 – положение фаски в момент проскальзывания по седлу; 3 – седло;

$AA_1 = BB_1 = l$ – линейное перемещение точки A во время проскальзывания фаски по седлу

За основу пути трения, как правило, принималась длина окружности, посередине высоты фаски, умноженная на время испытаний с учетом времени проворота клапана вокруг своей оси. Расчет реального пути трения представляется достаточно сложным. Это приводит к необходимости разработки подходов к возможному учету величины пути трения, приближенной к реальной, при определении износостойкости и установлении ее функциональной зависимости от параметров контактного взаимодействия как всего трибосопряжения, так и отдельных его элементов, что является ключевым звеном в объективности оценки результатов изучаемого процесса.

Цель работы – разработка математического описания износостойкости упрочненной поверхности фаски клапана (на данном этапе исследований) от задаваемых и определяемых параметров контактного взаимодействия с учетом ее изнашивания на интегрированном двумя перемещениями пути трения.

Методика проведения исследований

Для оценки изменения износостойкости фаски клапана использованы подходы, предложенные в работе [8], в соответствии с которыми рассматриваемые параметры контактного взаимодействия можно свести в четыре обобщенных безразмерных комплекса $\Pi_1 - \Pi_4$ и использовать их для определения вида уравнения регрессии. Степень влияния каждого из них на износостойкость определяется степенными показателями (коэффициентами), численные значения которых определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений. В этих уравнениях численные значения натуральных логарифмов износостойкости и безразмерных комплексов определяются соотношениями численных значений экспериментальных данных – параметров контактного взаимодействия. При этом количество неизвестных коэффициентов определит количество уравнений.

В общем виде зависимость износостойкости фаски клапана от рассматриваемых параметров будет иметь вид:

$$I = \frac{L_{\Sigma}}{\Delta h_{\Sigma}} = f(p, L_v, L_{\omega}, V, \omega, H_{\mu}, t, R_{a1}, R_{a2}), \quad (1)$$

где $h_{\Sigma} = h_{\omega} + h_v$ – суммарный линейный износ фаски клапана при линейном и угловом ее перемещении в контакте с поверхностью седла, мкм;

L_{Σ} – путь трения за время испытания, м;

L_v – путь трения за один цикл работы клапана при его линейном перемещении, мкм;

L_{ω} – путь трения за один цикл работы клапана при его вращении, мкм;

С учетом предложенного подхода выражение (1) примет вид:

$$I = B \left(\frac{k_v V t}{L_v} \right)^{\beta_1} \left(\frac{k_{\omega} \omega t}{L_{\omega}} \right)^{\beta_2} \left(\frac{H_{\mu}}{p} \right)^{\beta_3} \left(\frac{R_{a1}}{R_{a2}} \right)^{\beta_4}, \quad (2)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий долю линейного износа при линейном перемещении клапана;

k_{ω} – коэффициент, учитывающий долю линейного износа при вращении клапана.

Составленные безразмерные комплексы выражают следующее:

$$\Pi_1 = \frac{k_v V t}{L_v} \text{ – скорость линейного нагружения фрикционного контакта фаски с седлом в цикле}$$

за время t ;

$$\Pi_2 = \frac{k_{\omega} \omega t}{L_{\omega}} \text{ – скорость углового нагружения фрикционного контакта фаски с седлом в цикле за}$$

время t ;

$$\Pi_3 = \frac{H_{\mu}}{p} \text{ – относительная микротвердость упрочненного поверхностного слоя фаски;}$$

$$\Pi_4 = \frac{R_{a1}}{R_{a2}} \text{ – относительное изменение параметра шероховатости } R_a \text{ поверхности фаски за вре-}$$

мя испытаний (R_{a1} – значение до испытания; R_{a2} – после испытания).

В выражении (2) в первом и втором комплексах введены коэффициенты k_v и k_ω которые, будут определять долевую составляющую линейного износа поверхности фаски при ее контактном взаимодействии с поверхностью седла за время испытаний. Численные значения коэффициентов определяются исходя из того, в каком соотношении находятся численные значения перемещений в вертикальной и горизонтальной плоскостях за один оборот клапана (3):

$$\frac{k_v}{k_\omega} = \frac{L_v}{L_\omega}. \quad (3)$$

При проведении эксперимента установлено:

- фаска клапана в момент взаимодействия с седлом (закрытие клапана) смещается в горизонтальной плоскости на 4;
- точка на поверхности фаски клапана совершает перемещение по дуге равной 1,62 мм;
- за время одного проворота клапана он совершает 462 вертикальных перемещений.

Тогда путь трения при возвратно - поступательном движении клапана и его вращении определится в соответствии с выражениями (4 - 6):

$$L_v = l \cdot n_{отк.} \cdot t_{об.кл.}, \quad (4)$$

где l – путь, пройденный фаской клапана в момент взаимодействия с седлом во время закрытия клапана, мм; ($l = 1,62$ мм);

$n_{отк.}$ – частота открытия клапана (разрыва контактного взаимодействия) за 1 с; ($n_{отк.} = 11$ рад/с);

$t_{об.кл.}$ – время, за которое клапан совершает полный оборот, с; ($t_{об.кл.} = 42$ с).

$$L_\omega = 2\pi R - N_{отк.} l, \quad (5)$$

где $2\pi R$ – длина окружности средней линии фаски клапана, мм;

$N_{отк.}$ – число открытий клапана за 1 секунду ($N_{отк.} = 11$).

$$L_\Sigma = L_v + L_\omega. \quad (6)$$

После расчетов имеем следующие величины: $L_v = 0,7484$ м; $L_\omega = 0,128$ м; $L_{мп.с} = 0,8764$ м.

Таким образом, коэффициенты k_v и k_ω составляют 0,854 и 0,146 от доли общего износа фаски клапана, соответственно.

В соответствии с полученными расчетами выражение (2) можно переписать в виде:

$$I = B \left(\frac{0,854Vt}{L_v} \right)^{\beta_1} \left(\frac{0,146\omega t}{L_\omega} \right)^{\beta_2} \left(\frac{H_\mu}{p} \right)^{\beta_3} \left(\frac{Ra_1}{Ra_2} \right)^{\beta_4}. \quad (7)$$

Выравнивание представленной зависимости (7) позволяет представить ее в виде линейного полинома:

$$y = b_0 + \sum_{k=1}^4 b_k X_k, \quad (8)$$

$$\text{где } y = \ln I; \quad b_0 = \ln b; \quad b_k = \beta_{k-4}; \quad X_1 = \ln \left(\frac{0,854Vt}{L_v} \right);$$

$$X_2 = \ln \left(\frac{0,146\omega t}{L_\omega} \right); \quad X_3 = \ln \left(\frac{H_\mu}{p} \right); \quad X_4 = \ln \left(\frac{Ra_1}{Ra_2} \right).$$

Результаты исследований и их обсуждение

В результате анализа поверхностного слоя фаски испытанных натуральных образцов – клапанов определены их механо-геометрические характеристики – параметр шероховатости R_a , микротвердость H_μ , после каждого из временных периодов. Начальная шероховатость упрочненной фаски клапана составляла $R_{a1} = 0,63$, не упрочненной – $R_{a2} = 0,345$.

В результате обработки данных по параметрам нагружения, геометрическим размерам клапанов, контрольного взвешивания после каждого временного показателя испытаний, определены расчетным пу-

тем линейные износы фасок Δh , что позволило рассчитать интенсивности изнашивания и их износостойкость $I_{1,2}$.

В соответствии с экспериментальными данными (табл.1, 2) рассчитаны численные значения $X_1 - X_4$, составлена и решена система из пяти алгебраических уравнений для износостойкости упрочненной и не упрочненной фаски клапана. При этом выявилось, что коэффициент, определяемый значимость комплекса Π_4 , близок к нулю. Поэтому принято решение исключить данный комплекс (на данном этапе исследований), и представить систему из четырех уравнений. Каждое из уравнений определяет крайние значения износостойкости и их значения внутри рассматриваемого диапазона времени испытаний.

Таблица 1

Параметры контактного взаимодействия трибосопряжения с упрочненной фаской

Наименование параметра	Номер опыта					
	1*	2	3*	4*	5	6*
I_1	1542	5002	56818	32373	39170	40144
Δh , мкм	3,6	2,84	1,0	3,95	3,99	4,6
p , МПа	113	113	113	113	113	113
H_μ , ГПа	7,34	7,34	7,1	6,94	6,6	6,48
V , м/с	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
ω , рад/с	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
t , с (час)	43200 (12)	108000 (30)	432000 (120)	972000 (270)	1188000 (330)	1404000 (390)
R_a , мкм	0,62	0,617	0,591	0,57	0,55	0,52

Примечание: * – значения, используемые для расчетов.

Таблица 2

Параметры контактного взаимодействия трибосопряжения с не упрочненной фаской

Наименование параметра	Номер опыта					
	1*	2	3*	4*	5	6*
I_2	1762	5092	22552	32373	3,86	38714
Δh , мкм	3,15	2,79	2,52	3,95	4,05	4,77
p , МПа	113	113	113	113	113	113
H_μ , ГПа	5,57	5,34	5,21	5,02	4,92	4,84
V , м/с	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8
ω , рад/с	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
t , с (час)	43200 (12)	108000 (30)	432000 (120)	972000 (270)	1188000 (330)	1404000 (390)
R_a , мкм	0,32	0,3111	0,3105	0,3038	0,3040	0,299

Примечание: * – значения, используемые для расчетов.

Система уравнений для износостойкости упрочненной фаски имеет вид:

$$\begin{cases} 7,34 = b_0 + 10,29b_1 + 8,9b_2 + 4,17b_3; \\ 10,95 = b_0 + 12,88b_1 + 11,21b_2 + 4,14b_3; \\ 10,38 = b_0 + 13,69b_1 + 12,02b_2 + 4,12b_3; \\ 10,60 = b_0 + 14,06b_1 + 12,39b_2 + 4,05b_3. \end{cases} \quad (9)$$

Система уравнений для износостойкости не упрочненной фаски имеет вид:

$$\begin{cases} 7,47 = b_0 + 10,29b_1 + 8,9b_2 + 3,89b_3; \\ 10,02 = b_0 + 12,88b_1 + 11,21b_2 + 3,83b_3; \\ 10,38 = b_0 + 13,69b_1 + 12,02b_2 + 3,79b_3; \\ 10,56 = b_0 + 14,06b_1 + 12,39b_2 + 3,76b_3. \end{cases} \quad (10)$$

Решая полученную систему уравнений методом Крамера [9] определены значения коэффициентов:

$$\begin{array}{lllll} \text{- для (9)} & b_0 = 21,2; & b_1 = 19,46; & b_2 = -20,36; & b_3 = -7,89; \\ \text{- для (10)} & b_0 = 1,34; & b_1 = 5,7; & b_2 = -5,32; & b_3 = -1,33. \end{array}$$

Тогда линейные полиномы примут следующий вид:

$$y_1 = 21,2 + 19,46X_1 - 20,36X_2 - 7,89X_3; \quad (11)$$

$$y_2 = -1,34 + 5,7X_1 - 5,32X_2 - 1,33X_3. \quad (12)$$

В результате преобразования уравнения (11, 12) получены регрессионные зависимости износостойкости упрочненной I_1 и не упрочненной I_2 поверхности фаски клапана от рассматриваемых параметров:

$$I_1 = e^{21,2} \left(\frac{0,854Vt}{L_v} \right)^{19,46} \left(\frac{0,146\omega t}{L_\omega} \right)^{-20,36} \left(\frac{H_\mu}{p} \right)^{-7,89}, \quad (13)$$

$$I_2 = e^{1,34} \left(\frac{0,854Vt}{L_v} \right)^{5,7} \left(\frac{0,146\omega t}{L_\omega} \right)^{-5,32} \left(\frac{H_\mu}{p} \right)^{-1,33}. \quad (14)$$

С учетом выражений (4, 5):

$$I_1 = e^{21,2} \left(\frac{0,854 \cdot V \cdot t}{l \cdot n_{\text{отк}} \cdot t_{\text{об.кл.}}} \right)^{19,46} \left(\frac{0,146 \cdot \omega \cdot t}{2\pi \cdot R - N_{\text{отк}} \cdot l} \right)^{-20,36} \left(\frac{H_\mu}{p} \right)^{-7,89}, \quad (15)$$

$$I_2 = e^{1,34} \left(\frac{0,854 \cdot V \cdot t}{l \cdot n_{\text{отк}} \cdot t_{\text{об.кл.}}} \right)^{5,7} \left(\frac{0,146 \cdot \omega \cdot t}{2\pi \cdot R - N_{\text{отк}} \cdot l} \right)^{-5,32} \left(\frac{H_\mu}{p} \right)^{-1,33}, \quad (16)$$

где $e = 2,718...$ – основание натурального логарифма.

Анализ численных значений коэффициентов регрессионных зависимостей показывает, что основное влияние на износостойкость фаски клапана оказывают скорости нагружения ее контакта с седлом.

Полученные зависимости могут рассматриваться как математическое описание процесса изнашивания упрочненной и не упрочненной фаски клапана по времени испытания и от выявленного характера изменения микротвердости ее приповерхностных слоев при параметрах, определяющих путь трения. Зависимости можно использовать для анализа и прогнозирования трибологического качества приповерхностных слоев фаски с учетом интенсивности изменения микротвердости по мере их изнашивания. Однако полученные выражения на данном этапе исследований не могут отображать характер поведения износостойкости при изменении давления в зоне контакта и скоростей нагружения, поскольку при проведении испытаний уровни варьирования этими факторами не изменялись. Приведенное ограничение является направлением дальнейших исследований, что позволит уточнить значения показателей степени составленных обобщенных комплексов.

В соответствии с выражениями (13, 14) и данными табл. 1, 2, построены пространственные диаграммы износостойкости упрочненной и не упрочненной фаски клапана по истечению 120 часов испытаний (рис. 4, а, б). Из диаграмм следует, что прогнозируемый характер изменения износостойкости не упрочненной и упрочненной фаски при различных микротвердостях их поверхностных слоев на протяжении времени испытаний имеет существенные отличия.

Из приведенных результатов следует, что в поверхностных слоях упрочненной и не упрочненной фаски имеет место протекание структурных превращений, которые обуславливают колебательное изменение сопротивляемости изнашиванию с уменьшением ее амплитуды по времени испытаний. Это свидетельствует о том, что в период прирабатываемости тончайшие приповерхностные слои фаски способны в большей степени и до определенного предела накапливать деформации, не приводящие к их разруше-

нию. Причем первый предел износостойкости по времени испытаний наблюдается быстрее у не упрочненной фаски. В последующем же наблюдается усталостно - фрикционное разрушение структур, причем до определенного уровня, на котором внутри системы создаются условия для возможного последующего накопления деформаций, но с меньшим запасом прочности.

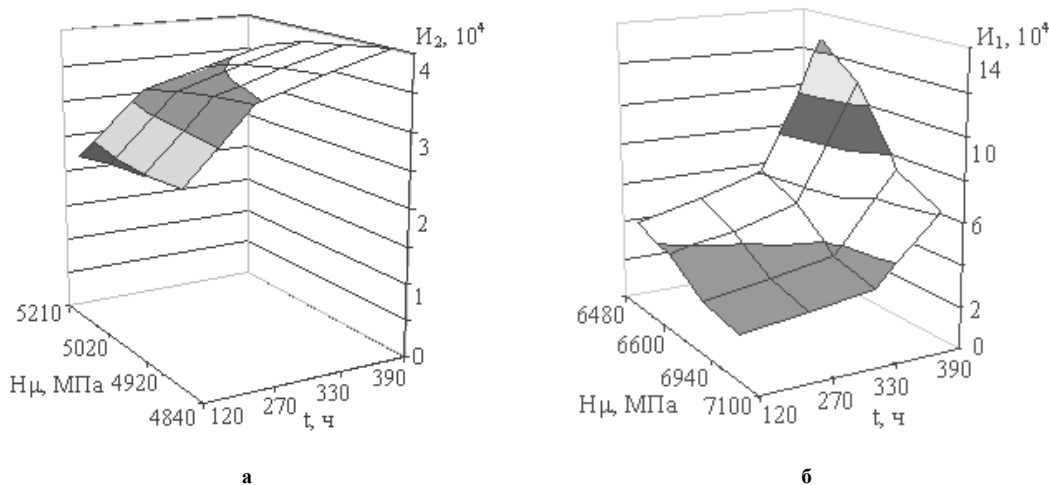


Рис. 4 – Пространственные диаграммы износостойкости фаски клапана при ее нагружении в трибосопряжении "фаска клапана - седло":

а – не упрочненная поверхность;
б – упрочненная поверхность

Выводы

Предложенные подходы при оценке параметров контактного взаимодействия трибосопряжения "фаска клапана - седло", экспериментальные данные результатов испытаний упрочненной фаски позволили составить из них безразмерные обобщенные комплексы и аппроксимировать их влияние на износостойкость регрессионной зависимостью.

Литература

1. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.1. Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроения, 1989. – 400 с.
2. Двигуни внутрішнього згорання. Т.6. Надійність машин / Ф.І. Абрамчук та інші. – К.: «Либідь», 2005. – 472 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.2. Динамика и конструирование: [Учебник для вузов] / [В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.]; под ред. В.Н.Луканина и М.Г. Шатрова. – [3-е изд. перераб.] – М.: Высш. шк., 2007. – 400с.
4. Чернета О.Г. Упрочнение рабочих поверхностей клапанов двигателей внутреннего сгорания / Чернета О.Г., Поддубный И.Н. // «Розвиток наукових досліджень 2007»: Мат. третьої міжнар. наук.-практич. конф. – [м.Полтава, 26-28 листопада 2007 р.]. – 2007. – Т.6. – С.83 – 84.
5. Поддубный И.Н. Моделирование свойств материалов после лазерного модифицирования / Поддубный И.Н., Ивченко Л.И., Чернета О.Г. // Вестник двигателестроения. – 2012. – №1 – С.215 – 217.
6. Пат. 33735 Україна, МПК⁸ B23K 26/12. Спосіб модифікації поверхні деталі лазером / Лисенко О.Б., Чернета О.Г., Піддубний І.М. [та ін.]; заявник та патентовласник Дніпродзержинський держ. техн. унів. – № 200802566; заявл. 28.02.08; опубл. 10.07.08, Бюл.№13.
7. Пат. 43294 Україна, МПК⁸ G23M 15/00. Пристрій для випробування клапанів двигунів внутрішнього згорання / Піддубний І.М., Чернета О.Г., Коробочка О.М. [та ін.]; заявник та патентовласник Дніпродзержинський держ. техніч. універ. – № 200902605; заявл. 23.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл.№15.
8. Кубич В.И. Математическое описание изнашивания элементов трибосопряжения "шейка – покрытие – вкладыш" / В.И.Кубич, Л.И. Ивченко, А.О. Щаднев // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського – 2011. – №3(68). – С.62 – 66.
9. Решение СЛАУ методом Крамера online // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – <http://math.semestr.ru/kramer/kramer.php>.

Поступила в редакцію 11.02.2013

Poddubny I., Kubich V., Korobochka A. Wear resistance of the strengthened facet of the valve and parameters of contact interaction of elements tribointerface "a valve facet - a saddle".

There are definition of a way of a friction for interface "a valve facet – a saddle" taking into account vertical moving of contact on a spiral is offered at closing of the valve and its horizontal rotation on a circle at opening at the expense of work of the mechanism of compulsory rotation for n quantity of cycles for an operating time in the work.

The technology of superficial hardening of details of mechanisms and internal combustion engine systems is developed. Mehano-geometrical characteristics of a blanket of valves' facets are defined.

As a result of data processing on loading parameters, to the geometrical sizes of valves, control weighing after each time indicator of tests, are defined settlement by linear wear facets that has allowed to calculate intensity of wear process and their wear resistance. The received system of the equations solved Kramer's method. Experimental data of results of tests of the strengthened facet have allowed to make of them the dimensionless generalised complexes and to approximate their influence on wear resistance regress dependence. The mathematical description of wear resistance of the strengthened surface of a facet of the valve of an internal combustion engine from parameters of contact interaction taking into account its wear process on the way of a friction integrated by two movings is developed.

There are spatial diagrammes of wear resistance of facets of the valve after tribotechnical tests are constructed.

Key words: wear resistance, contact interaction, surface, tests, the diagramme.

References

1. Hebdy M., Chichinadze A.V. Spravochnik po tribotekhnike, V 3 t., T.1., Teoreticheskie osnovy, M.Mashinostroeniya, 1989, 400 p. (Rus.).
2. Abramchuk F.I. Dviguni vnutrishn'ogo zgorannja, T.6, Nadijnist' mashin, Kiïv, Libid', 2005. 472 p. (Ukr.).
3. Lukanin V.N., Alekseev I.V., Shatrov M.G., Dvigateli vnutrennego sgoranija, V 3 kn. Kn.2. Dinamika i konstruirovanie, M., Vysshanya shkola, 2007, 400p. (Rus.).
4. Cherneta O.G., Poddubnyj I.N. Uprochnenie rabochih poverhnostej klapanov dvigatelej vnutrennego sgoranija, Rozvitok naukovih doslidzhen' 2007, Mat. tret'oi mizhnar. nauk.-praktich. konf., m.Poltava, 26-28 listopada 2007 r., 2007, T.6., pp.83 – 84. (Rus.).
5. Poddubnyj I.N., Ivshhenko L.I., Cherneta O.G. Modelirovanie svojstv materialov posle lazernogo modifitsirovanija, Vestnik dvigatelestroeniya, 2012, No1, pp.215 – 217. (Rus.).
6. Lisenko O.B., Cherneta O.G., Piddubnij I.M., Ivshhenko L.I., Gonchar A.V., Sposib modifikacii poverhni detali lazerom, Patent 33735 Ukraïna. (Ukr.).
7. Piddubnij I.M., Cherneta O.G., Korobochka O.M., Ivshhenko L.I., Kubich V.I., Pristriy dlja viprobuvannja klapaniv dviguniv vnutrishn'ogo zgorjannja, Patent 43294 Ukraïna. (Ukr.).
8. Kubich V.I., Ivshhenko L.I., Shhadnev A.O. Matematicheskoe opisanie iznashivaniya jelementov tribosoprjazhenija «shejka – pokrytie – vkladysj», Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu im. M. Ostrograds'kogo, 2011, No. 3(68), pp.62 – 66. (Rus.).
9. Reshenie SLAU metodom Kramera online, math.semestr.ru. (Rus.).