

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ «ПОРШНЕВАЯ КАНАВКА - ПОРШНЕВОЕ КОЛЬЦО»

Марьин Дмитрий Михайлович, аспирант кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

Хохлов Алексей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

Глуценко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатации мобильных машин и технологического оборудования»

ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 89279843479

e-mail: choclov.73@mail.ru

Ключевые слова: износ, трение, сопряжение, поршневая канавка, поршневое кольцо.

Для снижения износа деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» предлагается повысить микротвердость трущейся поверхности поршневой канавки поршня двигателя внутреннего сгорания формированием на ее поверхности оксидированного слоя методом микродугового оксидирования. Теоретически обосновано влияние микротвердости поверхности трения на износ деталей сопряжения. Представлены результаты теоретических расчетов.

Введение

В соответствии с классической теорией процесса трения условием снижения износа является выполнение двух правил, основанных на физическом анализе процесса. Первое правило положительного градиента механических свойств основано на теории молекулярного взаимодействия. Применительно к этому правилу, нижележащие слои трущегося тела обязаны иметь большую прочность по сравнению с вышележащими слоями. Положительный градиент при взаимодействии двух твердых тел при отсутствии пленки или промежуточной прослойки между поверхностями трения невозможен. Промежуточная прослойка достигается посредством искусственных покрытий, окисления поверхности и т.д.

Второе правило основано на минимальном внедрении контактируемого тела в сопряженную поверхность. Суть этого правила заключается в том, что жесткость и гладкость одной из поверхностей (как правило, большей по размеру) должны быть предельно большими. Это условие обеспечивает минимальное проникновение контртела в тело трущейся пары и, следовательно, сохранение на твердой поверхности

защитной пленки. Если поверхности сделать одинаковой твердости, то контактные давления будут выше, чем в случае, если одна из поверхностей будет более мягкой, следовательно, возможность повреждения защитной пленки на твердой поверхности будет больше. Если внедрение контртела в тело трущейся пары находится в пределах упругого деформирования, износостойкость наиболее высокая [1].

Исходя из вышесказанного, для обеспечения снижения износа деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» необходимо повысить микротвердость одной из трущихся поверхностей. В соответствии со вторым правилом, поскольку наибольшей является площадь поршневой канавки, необходимо повысить микротвердость этой поверхности формированием оксидированного слоя на трущихся поверхностях поршневых канавок, для чего предлагаем использовать метод микродугового оксидирования [2, 3, 4].

Под действием силы давления газов и силы трения поршневого кольца о цилиндр первое поршневое кольцо подвергается многократным радиальным перемещениям и скручиванию под воздействием терми-

ческих напряжений. В сочетании с ударным действием на краю поршневой канавки происходит объемная деформация и перемещение тонких металлических слоев поверхностного слоя трения в направлении боковой поверхности поршня [5]. В результате этого на поршневых канавках формируются зоны износа (рис. 1, 2).

Объекты и методы исследований

При расчете износа деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» сделаем следующие предположения:

- размер гильзы цилиндра остается неизменным;
- взаимное перемещение трущихся поверхностей поршневого кольца и поршневой канавки осуществляется в радиальном направлении с изменением угла контакта в зависимости от направления движения поршня;
- упругость кольца остается неизменной.

Износ поршневой канавки

$$i_1 = L_1 \cdot I_1, \quad (1)$$

где L_1 – путь трения поршневой канавки, мм (рис. 3); I_1 – интенсивность изнашивания поршневой канавки мм/мм.

Износ поршневого кольца

$$i_2 = L_2 \cdot I_2, \quad (2)$$

где L_2 – путь трения поршневого кольца, мм (рис. 3); I_2 – интенсивность изнашивания поршневого кольца, мм/мм.

Путь трения поршневой канавки

$$L_1 = t_2 - s_{\Gamma\Pi}, \quad (3)$$

где t_2 – радиальная толщина поршневого кольца, мм; $s_{\Gamma\Pi}$ – зазор между деталями в сопряжении «гильза цилиндра – поршень», мм.

Путь трения поршневого кольца

$$L_2 = \frac{h_1''}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

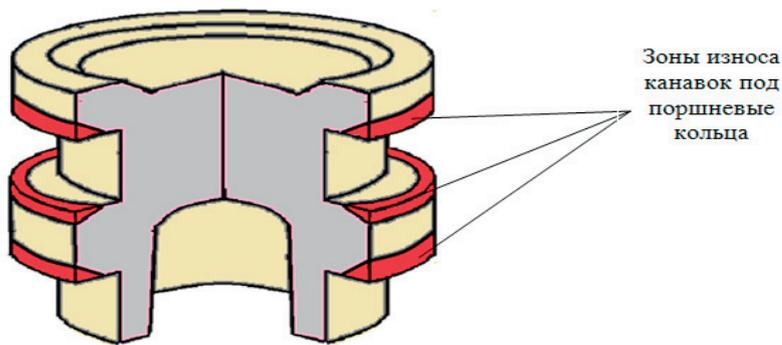


Рис. 1 – Зоны износа поршневых канавок

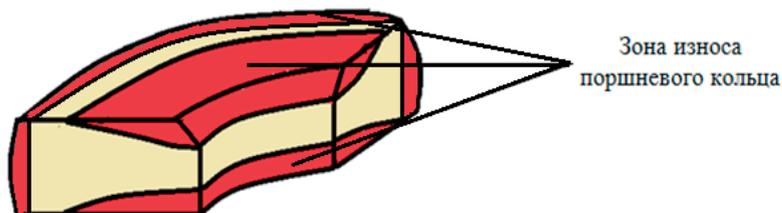


Рис. 2 – Зоны износа поршневого кольца

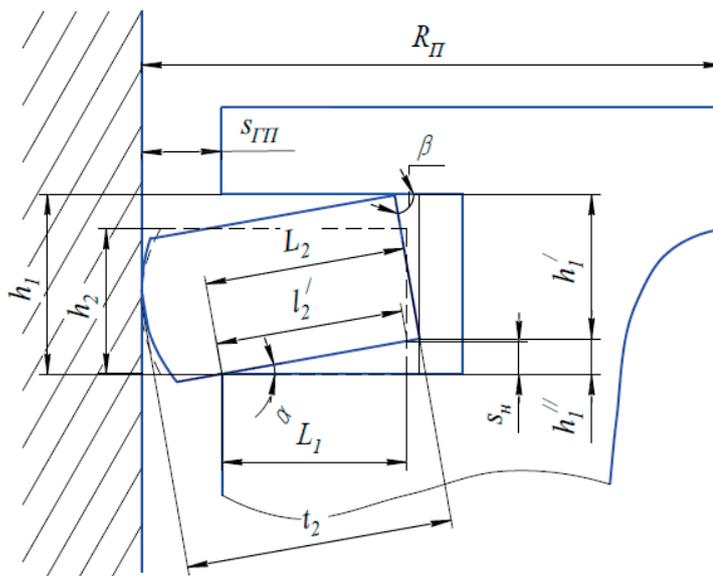


Рис. 3 - К расчету пути трения деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо»

где h_1'' – высота подъема нижней кромки поршневого кольца в поршневой канавке при «перекладке» поршня (т.е. при изменении опоры поршня на цилиндр с левой стороны юбки на правую), мм; α – угол горизонтального наклона поршневого кольца, град.

$$h_1'' = h_1 - h_1', \quad (5)$$

где h_1 – высота поршневой канавки, мм; h_1' – длина проекции внутренней стенки кольца при наклоне в поршневой канавке, мм.

$$h'_1 = h_2 \cdot \sin \beta, \quad (6)$$

где h_2 – высота поршневого кольца, мм; β – угол вертикального наклона поршневого кольца, град.

$$\sin \beta = \frac{L_1}{l'_2}, \quad (7)$$

где l'_2 – фактический путь трения поршневого кольца при его смещении в поршневой канавке, мм.

$$\sin \alpha = \frac{s_H}{l'_2}, \quad (8)$$

где s_H – зазор между деталями в сопряжении «поршневая канавка – поршневое кольцо», мм.

$$l'_2 = \sqrt{s_H^2 + L_1^2}, \quad (9)$$

С учетом выражений (1 - 9) путь трения поршневого кольца

$$L_2 = \frac{h_1 \left[s_H^2 + (t_2 + s_H)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - h_2 (t_2 + s_H)}{s_H}, \quad (10)$$

Номинальная площадь контакта поверхности поршневой канавки

$$F_{a1} = k \pi (R_{II}^2 - r_{BK}^2), \quad (11)$$

где k – коэффициент, учитывающий силу упругости поршневого кольца; R_{II} – радиус поршня, мм; r_{BK} – внутренний радиус поршневого кольца, мм.

Номинальная площадь контакта поверхности поршневого кольца

$$F_{a2} = k \pi \left[(r_{BK} + l'_2)^2 - r_{BK}^2 \right], \quad (12)$$

Силы, возникающие при давлении газов сгорающей топливо-воздушной смеси, действующие соответственно на поршневую канавку P_1 и поршневое кольцо P_2 , определяют из выражений [1]:

$$P_1 = \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau_2}{\sigma_{S_2}} \right) \cdot \left(\frac{r_2}{h_{max2}} \right) \right]^{3\nu_2} \cdot (HV_2 \cdot b_2)^3 \cdot \frac{F_{a1}^{x_2} \cdot \Gamma_2^2 \cdot R_{b_2}^2}{8^{2x_2}}, \quad (13)$$

$$P_2 = \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau_1}{\sigma_{S_1}} \right) \cdot \left(\frac{r_1}{h_{max1}} \right) \right]^{3\nu_1} \cdot (HV_1 \cdot b_1)^3 \cdot \frac{F_{a2}^{x_1} \cdot \Gamma_1^2 \cdot R_{b_1}^2}{8^{2x_1}}, \quad (14)$$

где τ_1 и τ_2 – удельная сила трения соответственно поршневой канавки (индекс 1) и поршневого кольца (индекс 2), Н; σ_{S_1} и σ_{S_2} – предел текучести материала поршневой канавки и поршневого кольца, МПа; r_1 и r_2 – радиус закругления неровностей трущихся поверхностей поршневой канавки и поршневого кольца, мм; h_{max1} и h_{max2} – максимальная высота неровностей трущихся поверхностей поршневой канавки и поршневого кольца соответственно, мм; HV_1 и HV_2 – микротвердости соответственно материала поршневой канавки и поршневого кольца, МПа; b_1 и b_2 – константы, характеризующие геометрию поверхностей соответственно поршневой канавки и поршневого кольца от вида механической обработки; F_{a1} и F_{a2} – номинальные площади контакта соответственно поршневой канавки и поршневого кольца, мм²; x_1 и x_2 – величины, зависящие от распределения неровностей трущихся поверхностей соответственно поршневой канавки и поршневого кольца по высоте; Γ_1 и Γ_2 – упругие постоянные материала соответственно поршневой канавки и поршневого кольца, МПа⁻¹; R_{b1} и R_{b2} – радиусы волны неровностей трущихся поверхностей соответственно поршневой канавки и поршневого кольца, мм.

Упругая постоянная материала поршневой канавки

$$\Gamma_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}, \quad (15)$$

где μ_1 – коэффициент Пуассона материала поршневой канавки; E_1 – модуль упругости материала поршневой канавки, МПа.

Упругая постоянная материала поршневого кольца

$$\Gamma_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (16)$$

где μ_2 – коэффициент Пуассона материала поршневого кольца; E_2 – модуль упругости материала поршневого кольца, МПа.

Радиус волны неровности трущейся поверхности поршневой канавки

$$R_{b_1} = \frac{L_1^2}{32 \cdot H_{b_1}}, \quad (17)$$

где L_1 – шаг волны неровности трущейся поверхности поршневой канавки, мм; H_{b_1} – высота волны неровности трущейся поверхности поршневой канавки, мм.

Радиус волны неровности трущейся поверхности поршневого кольца

$$R_{b_2} = \frac{L_2^2}{32 \cdot H_{b_2}}, \quad (18)$$

где L_2 – шаг волны неровности трущейся поверхности поршневого кольца, мм; H_{b_2} – высота волны неровности трущейся поверхности поршневого кольца, мм.

Контурные площади контакта поршневой канавки F_{c1} и поршневого кольца F_{c2} определяют из выражений [6, 7, 8]:

$$F_{c1} = \frac{p_a \cdot F_{a1}}{b_2 \cdot \varepsilon_2^{v_2} \cdot HV_1}, \quad (19)$$

где p_a – давление цилиндровых газов на поршневое кольцо, МПа; F_{a1} – номинальная площадь контакта поверхности поршневой канавки, мм²; b_2 и v_2 – константы, характеризующие геометрию поверхности поршневого кольца в зависимости от вида механической обработки; ε_2 – безразмерная величина, характеризующая относительное сближение поверхности поршневого кольца; HV_1 – микротвердость материала поршневой канавки, МПа.

$$F_{c2} = \frac{p_a \cdot F_{a2}}{b_1 \cdot \varepsilon_1^{v_1} \cdot HV_2}, \quad (20)$$

где p_a – давление цилиндровых газов на поршневое кольцо, МПа; F_{a2} – номинальная площадь контакта поверхности поршневого кольца, мм²; v_1 и b_1 – константы, характеризующие геометрию поверхности поршневой канавки в зависимости от вида механической обработки; ε_1 – безразмерная величина, характеризующая относительное сближение поверхности поршневой канавки; HV_2 – микротвердость материала поршневого кольца, МПа.

С учетом установленных размеров,

подлежащих изменениям поверхностей деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо», определим износ поверхности поршневой канавки i_1 и поршневого кольца i_2 . После преобразований выражений (1, 2) износ поверхности поршневой канавки i_1 и поршневого кольца i_2 можно определить следующим образом:

$$i_1 = 2 \cdot \left[\left(\frac{(v_2 + \varepsilon_2)^{\frac{1}{2}}}{2v_2^2 + 6v_2\varepsilon_2 - 3\varepsilon_2^2} \right) \left(\frac{1}{(v_2 + 1) \cdot n \cdot HV_1} \right) \left(\frac{p_a^{2v_2} \cdot F_{a1}}{\sigma_{S1} \cdot 2v_2} \right) \left(\frac{\sigma_{S1} - 2\tau_1}{\sigma_{S1}} \right)^{\frac{6v_2 - 3}{2}} \left(h_{\max 2}^{2-3v_2} \cdot r_2^{3v_2 - 2} \right) \right. \\ \left. (HV_2 \cdot b_2)^{\frac{6v_2 - 3}{2v_2}} (L_2 \cdot R_{b_2})^{\frac{2v_2 - 1}{2}} (t_2 - s_{III}) \right], \quad (21)$$

$$i_2 = 2 \cdot \left[\left(\frac{(v_1 + \varepsilon_1)^{\frac{1}{2}}}{2v_1^2 + 6v_1\varepsilon_1 - 3\varepsilon_1^2} \right) \left(\frac{1}{(v_1 + 1) \cdot n \cdot HV_2} \right) \left(\frac{p_a^{2v_1} \cdot F_{a2}}{\sigma_{S2} \cdot 2v_1} \right) \left(\frac{\sigma_{S2} - 2\tau_2}{\sigma_{S2}} \right)^{\frac{6v_1 - 3}{2}} \left(h_{\max 1}^{2-3v_1} \cdot r_1^{3v_1 - 2} \right) \right. \\ \left. (HV_1 \cdot b_1)^{\frac{6v_1 - 3}{2v_1}} (L_1 \cdot R_{b_1})^{\frac{2v_1 - 1}{2}} \left(\frac{h \left[s_u^2 + (t_2 + s_u)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - h_2 (t_2 + s_u)}{s_u} \right) \right]. \quad (22)$$

Таким образом, износ деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» зависит от состояния поверхностей трения (микротвердости поршневой канавки HV_1 , степени чистоты механической обработки v , b и свойств материала x , τ , R_b , σ_s , h_{\max} , G , r). Следовательно, для снижения износа деталей этого сопряжения необходимо в первую очередь повысить микротвердость поршневой канавки HV_1 .

Результаты исследований

Для установления зависимости износа от микротвердости оксидированного слоя расчет выполняли при значениях микротвердости оксидированного слоя поршневой канавки $HV_1 = 1100 \dots 1700$ МПа, с интервалом в 100 МПа, микротвердости поршневого кольца $HV_2 = 1100$ МПа, время работы деталей сопряжения – 400 ч.

После проведенных расчетов установлено, что при увеличении микротвердости поверхностного слоя поршневой канавки до 1300 МПа и неизменном значении микро-

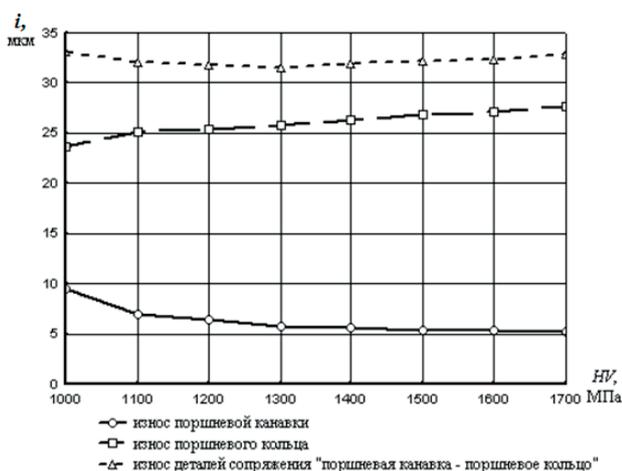


Рис. 4 – Зависимость износа деталей (i) сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» от микротвердости (HV) оксидированного слоя, формируемого на поверхности трения поршневой канавки

твердости поршневого кольца, наблюдается увеличение износа поршневого кольца в 1,07 раза по сравнению с типовой поршневой канавкой, имеющей микротвердость 980 МПа. Также установлено, что минимальный износ деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» - 31,5 мкм, обеспечивается при микротвердости оксидированного слоя поршневой канавки в пределах 1250...1350 МПа (рис. 4).

Формирование оксидированного слоя с микротвердостью 1250...1350 МПа на поверхности поршневой канавки позволяет снизить ее износ до 5,7 мкм, при этом износ поршневого кольца увеличивается до 25,8 мкм. Общий износ деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» за 400 ч также снижается и составляет 31,5 мкм, в то время как у типового сопряжения износ деталей составляет 33,1 мкм.

Выводы

Таким образом, для снижения износа поршней микротвердость оксидированного слоя поверхности трения поршневой канавки должна быть в пределах 1250...1350 МПа. При этом износ поршневой канавки оксидированного поршня за расчетный период работы деталей сопряжения 400 ч составил 5,7 мкм, что в 1,6 раза ниже, чем у поршневой канавки типового поршня (9,5 мкм). Из-

нос поршневого кольца у оксидированного поршня составил 25,8 мкм, что в 1,1 раза выше, чем у поршневого кольца типового поршня (23,6 мкм).

Библиографический список

1. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
2. Пат. 2439211 Российская Федерация, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана, и их сплавов / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, А.Л. Хохлов, В.А. Степанов, К.У. Сафаров; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина». – № 2010140537/02; заявл. 04.10.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. - 2 с.
3. Пат. 130003 Российская Федерация, МПК F02F 3/10. Поршень двигателя внутреннего сгорания / Д.М. Марьин, А.Л. Хохлов, Д.А. Уханов, В.А. Степанов, А.Ш. Нурутдинов, А.А. Хохлов. - № 2012151171; заявл. 28.11.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.
4. Влияние режимов микродугового оксидирования на образование оксидированного слоя / Д.М. Марьин, А.Л. Хохлов, Д.А. Уханов, А.А. Глущенко, В.А. Степанов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии . – 2013. - № 3(23). – С. 128-131.
5. Ждановский, Н.С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н.С. Ждановский, А. В. Николаенко – Л.: Колос, 1981. – 295с.
6. Основы трибологии (трение, износ, смазка):учебник для технических вузов / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под ред. А. В. Чичинадзе.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
7. Белый, В.А. Трибология: исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / В.А. Белый, К. Лудема, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – 454 с.
8. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. - М.: МСХА, 2001. – 616 с.