

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ДВС ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

INCREASE OF DURABILITY AND WEAR RESISTANCE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE PARTS BY CHANGING THEIR DESIGN FEATURES

В.А. КОЧЕНОВ¹, к.т.н.
К.Е. ГРУНИН²

¹ Нижегородская ГСХА

² Нижегородский ГИЭУ, Нижний Новгород, Россия,
konst.grunin2010@yandex.ru

V.A. KOCHENOV¹, PhD in Engineering
K.E. GRUNIN²

¹ Nizhny Novgorod State Agricultural Academy

² Nizhny Novgorod State University of Engineering
and Economics, Russia, konst.grunin2010@yandex.ru

На основании закономерностей износа, изменения и перераспределения нагрузок в процессе эксплуатации разработаны конструкторские решения повышения долговечности и износостойкости трибосопряжений кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. При разнообразии и разбросе факторов, определяющих долговечность и износостойкость, изменение износа и интенсивности износа в процессе эксплуатации имеет выраженный закономерный характер. У теоретического сопряжения нет периода приработки – оптимальные, т.е. приработанные геометрические параметры пары трения создаются в процессе механической обработки трущихся поверхностей деталей. Вследствие отсутствия периода приработки, ресурс теоретического – изготовленного с параметрами, соответствующими приработанным, – больше ресурса действительного неприработанного сопряжения. Как правило, трущиеся поверхности деталей машин имеют выраженный естественный, закономерный износ. Отклонения от естественного износа (нестественный износ) обусловлены: тяжелыми условиями работы без нарушения правил эксплуатации; нарушением технических условий – браком в изготовлении и в эксплуатации; несовершенным проектированием вследствие недостаточной изученности проблемы и ошибочно определенными техническими условиями на изготовление и эксплуатацию.

Эффективность восстановления работоспособности цилиндропоршневой группы заменой колец без замены цилиндров исследуется на 4-тактном, 4-цилиндровом двигателе ЗМЗ-402. В двух цилиндрах меняются поршни и кольца, в двух других – только кольца. В цилиндрах со старыми поршнями приработка протекает интенсивнее. По окончании холодной обкатки компрессия в цилиндрах со старыми поршнями выше, чем в цилиндрах с новыми поршнями. Эффективность достигается за счет большего соответствия геометрических параметров трибосопряжений со старыми поршнями своим приработанным значениям. Анализ натурных исследований подтверждает правомерность гипотезы теоретического исследования.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, трибосопряжение, долговечность, износостойкость, естественный износ, площадь скольжения, давление.

Based on the patterns of wear, change and redistribution of loads during operation, design solutions have been developed to improve the durability and wear resistance of tribo-joints of the crank mechanism and the cylinder-piston group of the internal combustion engine. With a variety and dispersion of factors determining durability and wear resistance, the change in wear and wear intensity during the operation has a pronounced regular character. Theoretical coupling does not have a run-in period – optimal, i.e. the obtained geometric parameters of the friction pair are created during the machining of friction surfaces of the parts. Due to the lack of a run-in period, the theoretical resource – produced with the expected parameters, the more effective the actual unattended interface. As a rule, friction surfaces of machine parts have a pronounced, natural, regular wear. Deviations from natural wear (unnatural wear) are caused by: severe working conditions without violating the rules of operation; violation of technical conditions – defective products in manufacture and in operation; imperfect design due to insufficient knowledge of the problem and mistakenly defined technical conditions for production and operation. The efficiency of restoring the efficiency of the cylinder-piston group by replacing the rings without replacement of the cylinders is investigated on a 4-stroke, 4-cylinder engine ZMZ-402. In two cylinders pistons and rings change, in the other two only rings. In the cylinders with old pistons, the running-in proceeds more intensively. At the end of cold running-in, compression in cylinders with old pistons is higher than in cylinders with new pistons. Efficiency is achieved due to a greater correspondence of the geometric parameters of tribo-conjugations with old pistons to its accumulated values. The analysis of field studies confirms the legitimacy of the hypothesis of the theoretical study.

Keywords: Internal combustion engine, tribocoupling, durability, wear resistance, natural wear, slip area, pressure.

Введение

Как правило, трущиеся поверхности деталей машин имеют выраженный естественный, закономерный износ. Отклонения от естественного износа (неестественный износ) обусловлены: тяжелыми условиями работы без нарушения правил эксплуатации; нарушением технических условий – браком в изготовлении и в эксплуатации; несовершенным проектированием вследствие недостаточной изученности проблемы и ошибочно определенными техническими условиями на изготовление и эксплуатацию [1–3].

Результаты анализа

Естественный износ цилиндра (рис. 1, *а*) характеризуется овальностью, конусообразностью, ступенчатостью, переменной интенсивностью износа ступеней в процессе эксплуатации. Овальность объясняется действием нормальной силы, определяющей «рабочие», изнашивающиеся поверхности цилиндра и поршня; конусообразность – более тяжелыми условиями работы в верхней части цилиндра. Ступенчатость обусловлена зависимостью износа от компрессионных колец – ступени располагаются в верхней мертвой точке, число ступеней равно числу колец. Переменная интенсивность износа ступеней объясняется в начале эксплуатации интенсивным износом пары цилиндр – верхнее кольцо, потом износом этой пары, перераспределением нагрузок

и повышением интенсивности износа пар цилиндр – нижние кольца.

Естественный износ поршня характеризуется неравномерным износом юбки, нагаром и прогоранием поверхности по оси поршневого пальца, неравномерным износом канавок под кольца. Износ юбки объясняется действием нормальной силы. Износ внизу юбки (рис. 1, *б*) наблюдается у поршней, вырабатывающих высокий ресурс. Износ поверхности, примыкающей к днищу поршня (рис. 1, *в*), является следствием неправильно определенных температурных деформаций, нарушений размеров деталей, перегрева двигателя. Износ юбки с двумя обособленными поверхностями наблюдается у поршней, работающих со стуком. Износ на рис. 1, *г* свидетельствует о большом размахе перекосов поршня и обуславливает повышенный расход масла на угар. Нагар и прогорание поршня объясняется плохой герметичностью трибосопряжений ЦПГ по оси пальца, особенно при положении замка компрессионных колец по оси пальца (рис. 1, *д*). Под действием давления газов кольцо разгибается, образуя зоны повышенных зазоров \mathcal{Z} .

Неравномерный износ канавок объясняется их неравной удаленностью от камеры сгорания. Износ компрессионных колец характеризуется повышенным износом верхнего кольца, односторонним износом кольца по высоте и, как правило, большим износом кольца относительно износа канавки. Упругость и давление

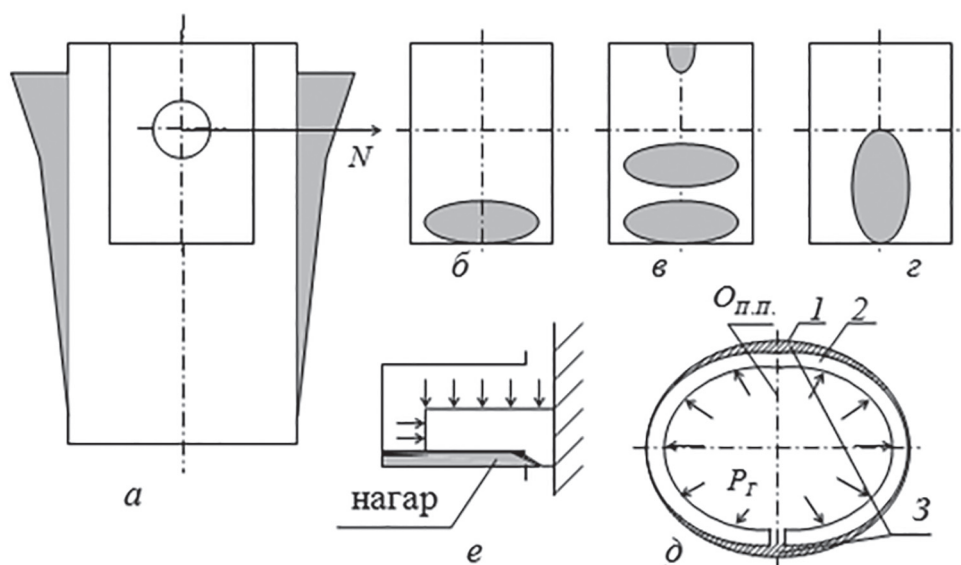


Рис. 1. Износ деталей цилиндропоршневой группы:

а – цилиндра; *б*, *в*, *г* – поршня; *д* – прорыв газов по оси поршневого пальца; *е* – образование нагара в трибосопряжении «кольцо – канавка»

газов определяют изнашивающиеся поверхности кольца – это поверхность, составляющая пару трения с цилиндром и пару трения с нижней стенкой канавки поршня (рис. 1, *д*). В процессе эксплуатации на канавке образуется нагар, защищающий ее от изнашивания, но ухудшающий триботехнические свойства и увеличивающий односторонний износ кольца.

Естественный износ шатунных сопряжений коленчатого вала характеризуется: равным износом сопряжений, относящихся к разным цилиндрам; односторонним износом шейки; большим износом вкладыша расположенного в шатуне – верхний вкладыш. Равный износ сопряжений объясняется равными нагрузками, смазыванием и т.д. Односторонний износ шейки и повышенный износ верхнего вкладыша объясняется переменным и циклическим характером нагрузок, действующих на сопряжение.

Износ коренных сопряжений характеризуется: неравномерным износом шейки; большим износом вкладыша, расположенного в крышке, – нижний вкладыш; разным износом сопряжений относительно друг друга; меньшими отклонениями от округлости сопряжений, находящихся рядом с маховиком. Неравномерный износ шейки, а также больший износ нижнего вкладыша, аналогично шатунному сопряжению, объясняется неравномерным на-

гружением в течение цикла. Разный износ сопряжений относительно друг друга определяется конструктивными особенностями КШМ и двигателя в целом. Особый износ сопряжений, расположенных рядом с маховиком, объясняется тем, что маховик сглаживает крутильные колебания и обладает гироскопическим эффектом, уменьшающим перекосы вала и пиковые нагрузки на близко расположенные к маховику опоры.

Наибольшая загруженность и максимальный износ трибосопряжений ДВС приходится при прохождении поршнем верхней мертвой точки между тактами сжатия и расширения (рис. 2, *а*). В этой точке, кроме высоких температур и нагрузок, нормальная сила N меняет направление, что приводит к перекадке поршня в цилиндре. Для плавности перекадки поршни, как правило, изготавливаются с бочкообразным профилем образующей. Бочкообразными предлагается выполнять и компрессионные кольца (рис. 2, *б*). Бочкообразная форма обеспечит стабильную площадь скольжения и давление на трущиеся поверхности пар трения. Переменный зазор между кольцом и канавкой нужен для того, чтобы во время перекадки поршень не захватывал и не отрывал кольцо от цилиндра. Это уменьшит вероятность прорыва газов между кольцом и цилин-

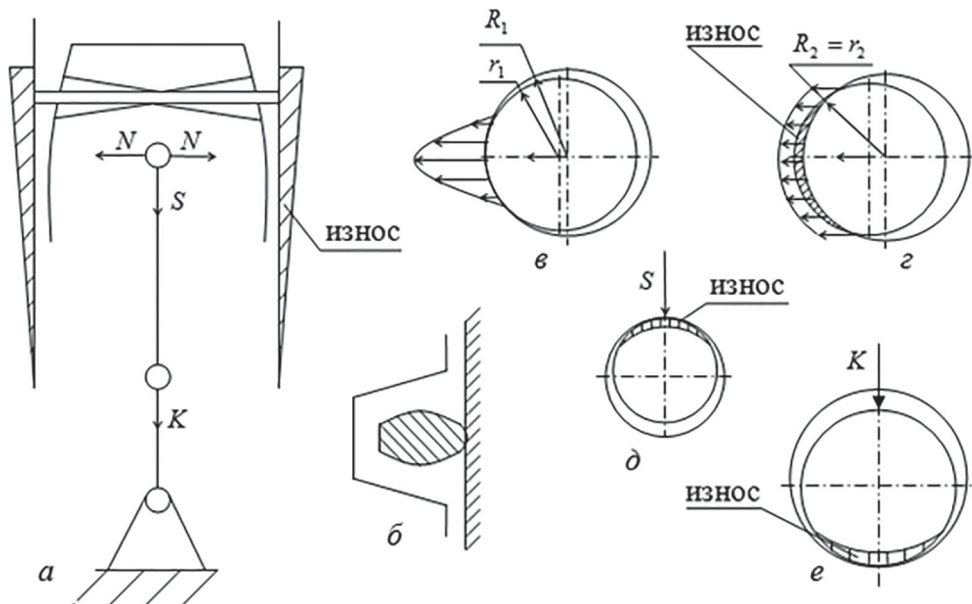


Рис. 2. Естественный износ и проектирование трибосопряжений:

- а* – положение максимального износа деталей КШМ и ЦПГ; *б* – сопряжение «поршень – кольцо – цилиндр» с бочкообразным кольцом и переменным зазором между кольцом и канавкой;
- в, г* – распределение нагрузки в неприработанном и приработанном сопряжении «поршень – цилиндр»;
- д, е* – шатунное и коренное сопряжение коленчатого вала

дром, снизятся сухое трение и задиры трущихся поверхностей, уменьшится ступенчатость износа зеркала цилиндра [4].

Интенсивность износа $\frac{dW}{d\tau}$ зависит от давления p на трущиеся поверхности: $\frac{dW}{d\tau} = k \cdot p^m$, где k, m – коэффициенты. Для уменьшения пиковых давлений, закономерных для ДВС, наиболее нагруженные секторы сопряжений должны иметь направленно увеличенную площадь скольжения. Например, в опорах коленчатых валов современных двигателей нижний вкладыш изготавливается без канавки для смазочного материала. За счет увеличения площади скольжения в момент максимальной нагрузки снижается давление на трущиеся поверхности. Аналогичного результата можно добиться приданием деталям геометрических параметров, соответствующих приработанным, т.е. изношенным. В секторе максимального износа (рис. 2, в) юбку поршня предлагается изготавливать радиусом, равным радиусу цилиндра (рис. 2, з). Аналогичная, приработанная форма предлагается и для шатунного и коренного сопряжений коленчатого вала (рис. 2, д, е) [5].

Для повышения герметичности цилиндропоршневой группы технические условия на сборку двигателя: 1) запрещают установку замков колец по оси пальца; 2) цилиндры с «технологической» овальностью из-за несовершенного изготовления зеркала рекомендуется устанавливать противоположно (перпендикулярно) изношенным. Целью сборки является создание в максимально изнашиваемых зонах сопряжения минимальных зазоров для отдаления аварийного периода эксплуатации и повышения долговечности ДВС.

Идея восстановления работоспособности трибосопряжений отражена на рис. 3. При выработке ресурса τ_2 , ограниченного предельным зазором S_2 , проводится операция, компенсирующая износ и сохраняющая приработанные параметры сопряжения. Восстановленное сопряжение снова эксплуатируется (кривая 2), отличаясь от нового меньшим зазором – $S_1^1 < S_1$ и временем прирабатывания – $\tau_1^1 < \tau_1$. Уменьшение достигается за счет «предыдущей» приработки пары трения.

Восстановление подшипниковых сопряжений заключается в подтяжке или замене вкладышей (рис. 4). Подтяжка применяется при действии на вал сил, имеющих постоянное направление относительно подшипника P_T (рис. 4, а, б, в). Вновь изготовленное сопряжение характеризуется малой площадью скольжения трущихся поверхностей и в рабочем положении является несоосным – ось подшипника O_3 не совпадает с осями вала O_1 и вращения O_2 (рис. 4, а). В процессе прирабатывания образуется новая форма подшипника, увеличивая площадь скольжения, и ось вновь образуемой трущейся поверхности подшипника изменяет свое положение O_3^1 (рис. 4, б). Новая ось совпадает с осями вала O_1 и вращения O_2 , и в рабочем положении узел трения становится соосным. Восстановление работоспособности заключается в удалении из разъема $A - A$ части прокладок (рис. 4, в). Подтяжка, компенсируя износ, не уменьшает площадь скольжения и не нарушает достигнутую при «предыдущем прирабатывании» соосность трибосопряжения.

Замена вкладышей применяется при действии сил, имеющих постоянное направление

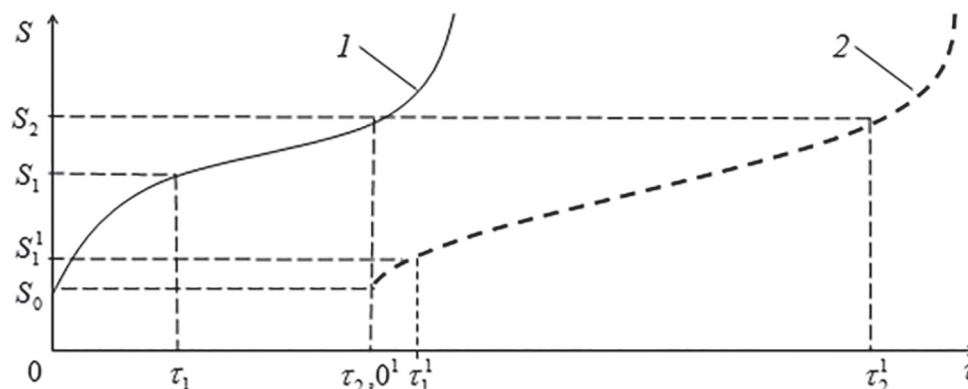


Рис. 3. Изменение зазора S от наработки τ нового 1 и восстановленного 2 сопряжений:

S_0, S_1, S_1^1, S_2 – зазоры начала эксплуатации, окончания приработки, начала аварийного изнашивания;
 $\tau_1, \tau_2, \tau_1^1, \tau_2^1$ – наработка периодов приработки и нормальной эксплуатации

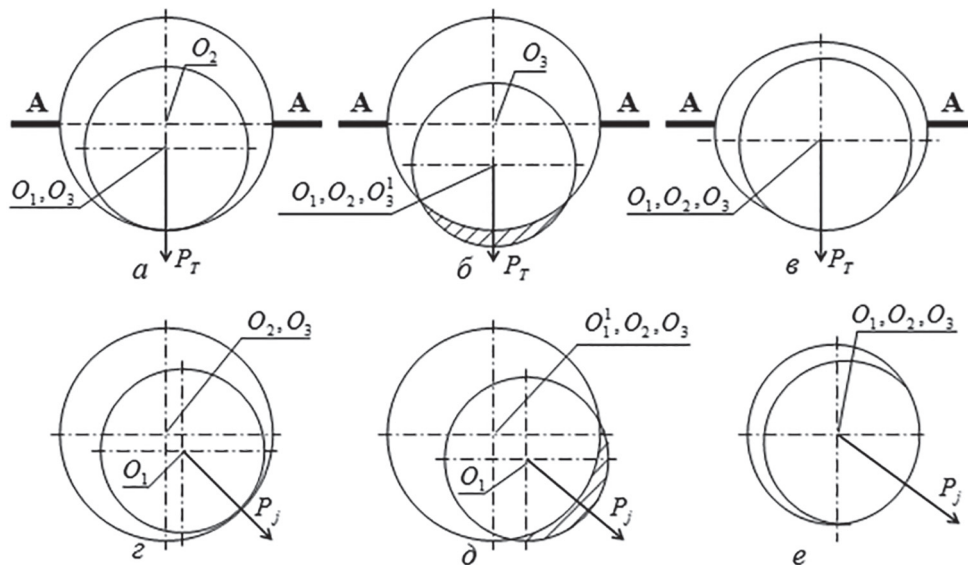


Рис. 4. Восстановление работоспособности подшипниковых узлов скольжения подтяжкой (а, б, в) и заменой вкладышей (г, д, е)

относительно вала P_j (рис. 4, г). Сопряжение является несоосным – ось вала O_1 не совпадает с осями подшипника O_3 и вращения O_2 . В процессе изнашивания образуется новая форма трущейся поверхности вала с осью O_1' , увеличивается площадь скольжения, достигается соосность узла трения (рис. 4, д). Приработка происходит за счет износа вала. После замены вкладышей износ компенсируется, уменьшается зазор, практически не нарушая площадь скольжения и соосность сопряжения.

Эффективность восстановления работоспособности ЦПГ заменой колец без замены

цилиндров исследуется на 4-тактном, 4-цилиндровом двигателе ЗМЗ-402 (рис. 5). В двух цилиндрах меняются поршни и кольца, в двух других – только кольца. В цилиндрах со старыми поршнями приработка протекает интенсивнее. По окончании холодной обкатки компрессия в цилиндрах со старыми поршнями выше, чем в цилиндрах с новыми поршнями. Эффективность достигается за счет большего соответствия геометрических параметров трибосопряжений со старыми поршнями своим приработанным значениям.

Анализ натуральных исследований подтверждает правомерность гипотезы теоретического исследования.

Заключение

Проектирование приработанных трибосопряжений с соответствующей модернизацией производства трущихся поверхностей деталей уменьшит период приработки и повысит долговечность и износостойкость узлов трения.

Литература

1. Коченов В.А. Конструирование и эксплуатация автомобильных двигателей. Княгинино: Нижегород. гос. инж.-эконом. ин-т, 2009. 163 с.
2. Коченов В.А. Естественный износ и проектирование приработанных трибосопряжений поршневых ДВС // Вестник машиностроения. 2013. № 1. С. 34–38.
3. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под

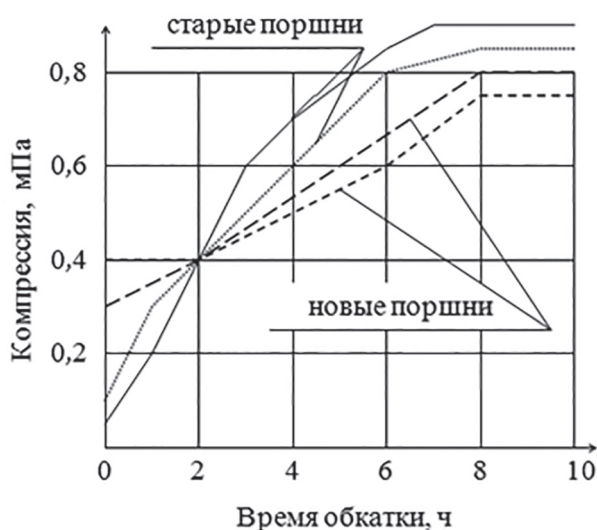


Рис. 5. Изменение компрессии в процессе холодной обкатки двигателя

общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

4. Чекушин В.Н., Коченов В.А., Жолобов Л.А. Цилиндропоршневая группа: патент на полезную модель № 10785, Российская Федерация. Опубликовано 01.09.99. Бюл. № 8.
5. Чекушин В.Н., Коченов В.А., Жолобов Л.А. Подшипник скольжения: патент на полезную модель № 10806, Российская Федерация. Опубликовано 6.08.99. Бюл. № 8.

References

1. Kochenov V.A. Konstruirovaniye i ekspluatatsiya avtomobil'nykh dvigateley [Design and operation of automobile engines]. Knyaginino: Nizhegorod. gos. inzh.-ekonom. in-t Publ., 2009. 163 p.
2. Kochenov V.A. Natural wear and design of worn out tribo-joints of piston engines. Vestnik mashinostroeniya. 2013. No 1, pp. 34-38 (in Russ.).
3. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. i dr. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Pod obshch. red. A.V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p.
4. Chekushin V.N., Kochenov V.A., Zholobov L.A. Tsilindroporshnevaya gruppa [Cylinder piston group]: patent na poleznuyu model' No 10785, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 01.09.99. Byul. No 8.
5. Chekushin V.N., Kochenov V.A., Zholobov L.A. Podshipnik skol'zheniya [Plain bearings]: patent na poleznuyu model' No 10806, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 6.08.99. Byul. No 8.