

ТОРШНЕВЫЕ
КОЛЬЦА

Карл Э Н Г Л И Ш
ПОРШНЕВЫЕ КОЛЬЦА
Редакторы издательства *Л. Н. Данилов*
и *И. Я. Меренская*
Технический редактор *А. Ф. Уварова*
Корректор *И. Г. Петрова*
Обложка художника *А. Я. Михайлова*

Сдано в производство 25/I 1962 г. Подписано
к печати 11/VI 1962 г. Тираж 6000 экз.
Печ. л. 36,5. Уч.-изд. л. 39,4. Бум. л. 18,25
Формат 60×90¹/₁₆. Зак. 875 Цена 2 р. 96 к.

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза,
Ленинград, ул. Моисеенко, 10



KOLBENRINGE

VON

DR.=ING CARL ENGLISCH

IN ZWEI BANDEN

BAND I

THEORIE, HERSTELLUNG
UND BEMESSUNG

MIT 485 TEXTABBILDUNGEN

WIEN

SPRINGER=VERLAG

1958

ПОРШНЕВЫЕ КОЛЬЦА

Том I

*ТЕОРИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ
И РАСЧЕТ*

Перевод с немецкого инж. С. К. Личака

под ред. д-ра техн. наук В. К. ЖИТОМИРСКОГО



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1962

В книге рассматриваются вопросы теории, конструкции и изготовления поршневых колец главным образом для двигателей внутреннего сгорания. Подробно освещены вопросы расчета колец, их работы в различных эксплуатационных условиях, влияние различных факторов на трение между кольцами и цилиндрами. Излагаются вопросы применения различных материалов и вопросы изготовления колец для поршневых машин. Даются рекомендации по наиболее целесообразной технологии изготовления колец из различных материалов. Указана методика измерения напряжений в готовых кольцах

Книга предназначена для инженеров-конструкторов и технологов, а также может быть полезна студентам технических вузов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Следуя пожеланиям специалистов по двигателестроению, в настоящей работе, пожалуй впервые, мы сделали попытку обобщить научные и опытные данные о поршневых кольцах, которые содержатся в обширной, но разрозненной литературе. При этом прежде всего использовались иностранные источники, зачастую трудно доступные.

Ознакомление с вопросами, изложенными в этой работе, поможет, надо полагать, конструкторам поршневых машин всех видов, инженерам-испытателям и исследователям и, наконец, потребителям лучше узнать значение поршневых колец и особенности конструирования, изготовления и эксплуатации их.

Недостатки и недоработки в изложении следует объяснить тем, что написание труда шло у автора наряду с большой профессиональной нагрузкой.

Автор выражает сердечную благодарность всем фирмам, которые с готовностью предоставили многочисленные материалы, и издательству — за помощь в работе и тщательное оформление книги.

Лето, 1957

К. ЭНГЛИШ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Поршневые кольца в главных областях их применения предназначены для уплотнения и создания совместно с поршнем изолированных пространств, находящихся по обе стороны поршня в цилиндре поршневой машины.

Надежно изолировать указанные пространства можно только при условии, если между рабочей поверхностью поршневого кольца и сопряженной поверхностью цилиндра и между хотя бы одной торцовой поверхностью кольца и соответствующим торцом канавки поршня имеются и длительное время сохраняются по меньшей мере по одной замкнутой линии соприкосновения.

Рабочая поверхность поршневого кольца обычно прилегает к сопряженной поверхности цилиндра под действием радиального давления, зависящего от соответствующего рабочего состояния кольца. Радиальное давление кольца на стенку цилиндра может вызываться силами собственной упругости кольца или особыми пружинящими элементами, давлением газа или жидкости, соответствующим образом подаваемых для воздействия на внутреннюю поверхность кольца, или же давлением иного средства, усиливающим или создающим прижатие неупругого кольца. В зависимости от этого различают: поршневые кольца с силами собственной упругости (самопружинящие поршневые кольца), кольца с вспомогательной упругостью и кольца с посторонней упругостью.

Помимо задачи уплотнения на долю поршневых колец, прежде всего в наиболее важных областях их применения, выпадает задача распределения смазочного масла в цилиндрах и (всегда совместно с поршнем) регулирования расхода масла. В зависимости от того, должно ли кольцо выполнять главным образом первую или вторую задачу, различают:

уплотнительные (компрессионные кольца) и маслосъемные или маслораспределительные кольца.

Самопружинящие кольца в рабочем состоянии могут прилегать плотно либо своей внешней, либо внутренней поверхностью. В первом случае, характеризующем нормальное применение, говорят о кольцах, пружинящих наружу, во втором случае — внутрь.

Наряду с уже упоминавшимися функциями, поршневые кольца во многих случаях, прежде всего в двигателях внутреннего сгорания, а отчасти и в паровых машинах, компрессорах и т. д. должны выполнять еще и другую важную функцию — отводить большую или меньшую часть воспринимаемого поршнем тепла к охлаждаемой стенке цилиндра.

Поршни могут совершать обычное возвратно-поступательное или иногда вращательное движение. В последнем случае уплотняющие свойства колец принципиально не изменяются, но возникают иные условия их движения, смазки и изнашивания.

При выборе материала, формообразовании колец, расчете радиального удельного давления на стенку цилиндра, при расположении колец на поршне и выборе кольцевого уплотнения следует иметь в виду все, присущие кольцам главные функции.

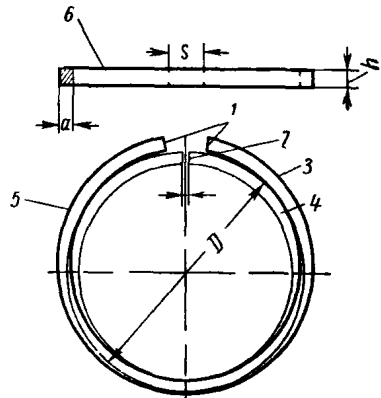
Вследствие своего недоступного положения, поршневое кольцо является одной из наиболее трудно наблюдаемых и с большим трудом обслуживаемых в эксплуатации деталей. Поэтому о механических и термических напряжениях, а также об условиях движения этой детали, работающей на износ, в настоящее время имеется значительно меньше надежных данных, чем о многих других деталях машин.

Значение, которое имеет поршневое кольцо, как деталь машины, ни в коем случае не следует недооценивать. От исправной работы поршневого кольца в большинстве случаев зависит исправная и экономичная работа поршневой машины (двигателя) в целом.

ГЛАВА II

ТЕОРИЯ САМОПРУЖИНЯЮЩИХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

Если поршневое кольцо пружинящее наружу (фиг. 1), которое в свободном состоянии на своих концах должно иметь для достижения пружинного эффекта соответствующий зазор (в стыке), стянуть упругой, например, очень тонкой стальной лентой или струной и т. п. до рабочего зазора в замке, то кольцо может принять либо строго круглую форму, либо отличную от нее форму. В зависимости от того, стремятся ли преднамеренно к круглой форме или посредством соответствующих мероприятий при изготовлении колец к отличной от нее, подчиняющейся определенному закону, различают круглые и некруглые кольца.



ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ И СРЕДНЕЕ РАДИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ НА СТЕНКУ ЦИЛИНДРА

«Действительное» радиальное давление p_f кольца, вставленного в цилиндр номинального диаметра, действующее на окружности и отнесенное к единице площади рабочей поверхности прилегания, распределяется, как правило, либо преднамеренно, либо, вследствие некоторых небольших различий в материале и неточности обработки, неравномерно по всей окружности, а на разных участках различно. Однако для того чтобы просто и наглядно исследовать условия упругости и напряжения, оперируют вместо «действительного» радиального давления p_f , различного на разных участках, условным равномерным «средним» радиальным давлением p , которое оказывается

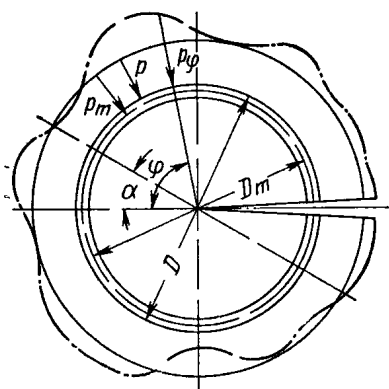
Фиг. 1. Наименование и обозначение отдельных элементов поршневого кольца

1 — концы кольца; 2 — зазор в стыке поршневого кольца в рабочем состоянии; 3 — кольцо в свободном состоянии; 4 — кольцо в сжатом (рабочем) состоянии; 5 — рабочая поверхность кольца; 6 — торцовые поверхности (торцы) поршневого кольца; а — радиальная толщина кольца; h — осевая высота кольца; D — номинальный диаметр кольца.

кольцом на стенку цилиндра. Между этими двумя давлениями существует зависимость

$$p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_\varphi d\varphi.$$

Как следует из условий равновесия для поршневого кольца в сжатом состоянии, т. е. вставленного («заведенного») в цилиндр, значение интеграла должно быть, кроме того, при всех обстоятельствах, в любом диаметральной направлении (фиг. 2) для обеих половин кольца одинаковым, т. е.



Фиг. 2 Поршневое кольцо в сжатом состоянии.

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} p_\varphi \sin(\varphi - \alpha) d\varphi = \\ = \int_{\pi+\alpha}^{\pi+2\alpha} p_\varphi \sin(\varphi - \alpha) d\varphi = 2p. \end{aligned} \quad (1)$$

Угол φ в этой формуле может отсчитываться от любой прямой, проведенной через центр кольца.

При известных условиях на окружности кольца могут также действовать сосредоточенные усилия, направленные к центру кольца; тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} p_\varphi \sin(\alpha - \varphi) d\varphi + \sum_{\alpha}^{\pi+\alpha} P \sin \varphi_P = \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} p_\varphi \sin(\varphi - \alpha) + \\ + \sum_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} P \sin \varphi_P. \end{aligned} \quad (1a)$$

Для производства правильного расчета представляется целесообразным считать, что нагрузка, действующая на наружную поверхность кольца, приложена к осевой линии кольца. Тогда радиальное давление p_φ , действующее на окружности кольца, должно быть приведено к осевой линии кольца. Пользуясь обозначениями фиг. 2, можно записать

$$p_{\varphi m} = p_\varphi \frac{D}{D_m} \quad \text{или} \quad p_m = p \frac{D}{D_m}. \quad (2)$$

Следует, однако, упомянуть, что во многих уравнениях и формулах, служащих для расчета поршневого кольца, как они, например, приводятся в справочниках некоторых заводов поршневых колец, радиальное давление на окружности принимается равным радиальному давлению, приведенному к среднему диаметру кольца. Допу-

скаемая при этом ошибка практически не имеет значения; однако этим объясняются некоторые несоответствия в упомянутых уравнениях.

А. Круглые кольца

1. Конструктивные формы круглого кольца в свободном состоянии

С самого начала в изготовлении поршневых колец стремились к получению круглой формы кольца, характеризующейся одинаковым по всей окружности кольца удельным радиальным давлением. Однако в ходе развития оказалось, что такое кольцо не обеспечивает наиболее благоприятную, в отношении эксплуатации, работу и что некруглое кольцо во многих отношениях его превосходит. Несмотря на то, что на практике в настоящее время во многих случаях отходят от применения круглых колец, они все-таки в нашем изложении вначале положены в основу некоторых принципиальных теоретических положений, в отношении напряжений в кольцах и в отношении конструкции колец. Эти положения излагаются подробно, тем более, что они служат также основой для расчета и конструирования некруглых колец. Об отступлении от равномерного распределения радиальных давлений, вытекающем из предъявляемых к кольцу требований и практического изготовления колец более подробно сказано на стр. 45.

Уравнение упругой линии круглого поршневого кольца. Приближенное решение

Имеется много возможностей конструирования поршневых колец таким образом, чтобы они в цилиндре оказывали теоретически равномерное радиальное давление на его стенку; тем не менее, имеется только одна единственная, вполне определенная форма кольца, которая при сечении, одинаковом по всей окружности кольца, обеспечивает равномерное радиальное давление определенной величины. Если, например, радиальная толщина или высота кольца или обе одновременно изменяются по окружности, то нет никакого ограничения для числа возможных форм колец с правильной эпюрой давлений.

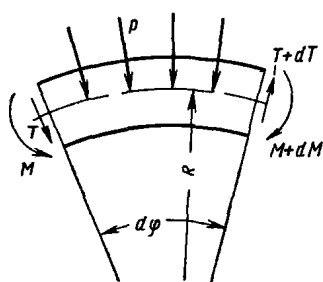
Правильная форма круглого кольца в свободном состоянии при постоянном сечении (а только такое кольцо представляет в настоящее время интерес) может рассчитываться с большим приближением по законам теории упругости.

При выводе уравнений для формы кольца в свободном состоянии с равномерным (т. е. постоянным и непрерывным во всех точках окружности) радиальным давлением пользуются следующим, во многих отношениях важным для изготовления колец, соображением.

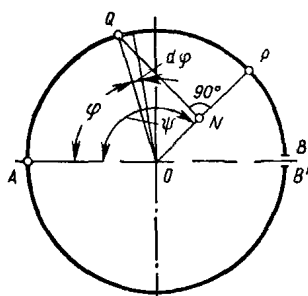
Под влиянием «гидростатического» давления определенной величины p , действующего снаружи равномерно во всех точках окру-

ности, кольцо должно сомкнуться в правильную форму круга. Однако, как вытекает из закона действия и противодействия, идеально круглое, открытое, т. е. в одном месте разрезанное, кольцо в свободном состоянии под воздействием на его внутреннюю цилиндрическую поверхность одинакового гидростатического давления P принимает такую форму, которую в первом случае имело кольцо в свободном состоянии. Изгибающие моменты и напряжения, возникающие во всех сечениях, а поэтому и деформации в обоих случаях кольца в свободном состоянии такая же, как у гидростатически нагруженного изнутри круглого кольца, разрезанного в одной точке (в замке).

Силы и моменты, действующие на элемент вставленного в цилиндр кольца высотой h , показаны на фиг. 3. Предполагая, что внешняя



Фиг. 3. Кольцо, сомкнутое в круг.



Фиг. 4. К расчету общей деформации кольца.

нагрузка кольца исчезает в том месте, где изгибающий момент равен нулю, а это имеет место до тех пор, пока в замке остается зазор, что опять-таки представляет собой необходимое условие для нормальной работы кольца, находим, что (усиливающий кривизну) изгибающий момент в произвольном сечении связан с местным радиальным давлением следующим уравнением:

$$M + \frac{d_m^2 M}{d\varphi^2} = pr_m^2 h$$

и соответствующий элемент кольца будет повернут (фиг. 4) на угол

$$d\beta = \frac{Mr_m}{\epsilon J} d\varphi,$$

где r_m — радиус нейтрального волокна кольца, сомкнутого в круг.

Общую деформацию кольца можно определить суммированием всех элементарных перемещений следующим образом.

Под влиянием изгиба элемента $r_m d\varphi$ в точке Q (фиг. 4) точка P переместится на отрезок $\overline{QP} \cdot d\beta$ перпендикулярно направлению $\overline{QP}$; при этом точка P переместится по часовой стрелке внутрь по направ-

лению к O на отрезок $\overline{QN} \cdot d\beta$ и повернется одновременно вокруг точки O , как центра вращения, на отрезок $\overline{NP} \cdot d\beta$ также по часовой стрелке. Если обозначить перемещения в радиальном направлении через u и считать их положительными от центра наружу, а перемещения, увеличивающие угол φ , через ε , то получим:

$$du = -r_m \sin(\psi - \varphi) d\beta;$$

$$d\varepsilon = [1 - \cos(\psi - \varphi)] d\beta$$

и результирующие перемещения точки P будут:

$$u = -\frac{r_m^2}{EJ} \int_0^\varphi M_b \sin(\psi - \varphi) d\varphi \quad (3)$$

и

$$\varepsilon = \frac{r_m}{EJ} \int_0^\varphi M_b [1 - \cos(\psi - \varphi)] d\varphi. \quad (3a)$$

Так как действительное радиальное давление p_φ предполагается постоянным, то

$$M_b = phr_m^2 (1 + \cos \varphi). \quad (36)$$

Простое интегрирование уравнений (3) и (3a) при условии, что $u = 0$ для $\varphi = 0$ (т. е. середина кольца против замка принимается за неподвижную точку) дает

$$u = \frac{pr_m^4 h}{EJ} \left(1 - \cos \varphi + \frac{\varphi}{2} \sin \varphi \right) = kr_m \left(1 - \cos \varphi + \frac{\varphi}{2} \sin \varphi \right); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{pr_m^3 h}{EJ} \left(\varphi - \frac{1}{2} \varphi \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right) = \\ &= k \left(\varphi - \frac{1}{2} \varphi \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right), \end{aligned} \quad (4a)$$

где

$$\frac{pr_m^3 h}{EJ} = k.$$

Таким образом, если требуется, чтобы кольцо прижималось к стенке цилиндра с равномерным радиальным давлением, то полярные координаты r_m , φ , точки P кольца в рабочем (сжатом) состоянии должны для кольца в свободном состоянии равняться соответственно $r_m + u$, $\varphi - \varepsilon$.

На фиг. 5 сплошными линиями показаны значения приведенных составляющих перемещений u/kr_m и ε/k .

Если же изображение упругой линии должно строиться только с помощью нанесения радиальных расстояний от начала координат, т. е. радиусов-векторов, то в рассчитанные значения перемещений u

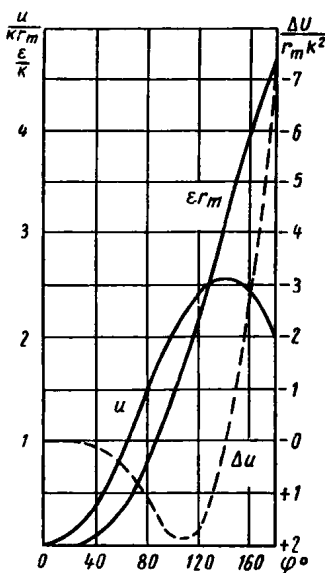
должны быть внесены поправки для того, чтобы учесть угловые перемещения ε ; в этом случае получим

$$\Delta u = \varepsilon \frac{du}{d\varphi} = \frac{r_m}{2} \left(\frac{p_m r_m^3}{EJ} \right) \left(\varphi - \frac{\varphi}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right) (3 \sin \varphi + \varphi \cos \varphi) = \\ = \frac{r_m k^2}{2} \left(\varphi - \frac{\varphi}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right) (3 \sin \varphi + \varphi \cos \varphi). \quad (5)$$

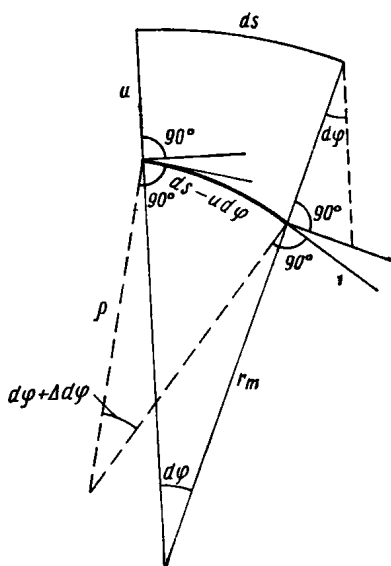
Тогда координаты точек упругой линии кольца в свободном состоянии будут

$$\begin{cases} r_m + u + \Delta u; \\ \varepsilon. \end{cases}$$

На фиг. 5 значения $\Delta u/k^2 r_m$ нанесены штриховой линией.



Фиг. 5. Координаты точек осевой линии кольца (по Свифту [2]).



Фиг. 6 К составлению уравнения упругой линии кольца.

Часто при определении формы кольца в свободном состоянии исходят из общего уравнения упругой линии криволинейного бруса (см., например, [1])¹.

$$\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r_m} = \frac{M_b}{EJ}. \quad (6)$$

Из фиг. 6 следует, что

$$\frac{1}{r_m} = \frac{d\varphi}{ds} \quad \text{и} \quad \frac{1}{\varrho} = \frac{d\varphi + \Delta d\varphi}{ds - u d\varphi},$$

¹ Числа, приведенные в квадратных скобках, относятся к перечню литературы, приложенному в конце книги.

где

$$u = \varrho - r_m.$$

Пренебрегая малыми величинами высшего порядка, получим

$$\Delta d\varphi = \frac{d^2 u}{ds^2} ds \quad \text{и} \quad \frac{1}{\varrho} = \frac{d\varphi + \frac{d^2 u}{ds^2} ds}{ds - \frac{uds}{r_m}}.$$

Кроме того, предполагается, что осевая линия кольца в свободном состоянии лишь немного отличается от формы окружности, а также, что отношение радиальной толщины к радиусу кривизны мало. Эти предположения, впрочем, положены в основу ранее изложенных выводов. Так как и величина u может быть принята малой по сравнению с r_m , то приближенно можно положить, что

$$\frac{1}{\varrho} = \left(1 + \frac{u}{r_m}\right) \frac{d\varphi}{ds} + \frac{d^2 u}{ds^2} = \frac{1}{r_m} \left(1 + \frac{u}{r_m}\right) + \frac{d^2 u}{ds^2}.$$

Подставляя значения $1/\varrho$ в уравнение (6), получим

$$\frac{u}{r_m^2} + \frac{d^2 u}{ds^2} = \frac{M}{EJ}$$

и так как $ds = r_m d\varphi$, то

$$u + \frac{d^2 u}{d\varphi^2} = \frac{Mr_m^2}{EJ}. \quad (7)$$

Для равномерно распределенного радиального давления $p_m = \text{const}$:

$$M = p_m r_m^2 h (1 + \cos \varphi).$$

Если снова обозначить

$$\frac{p_m h r_m^3}{EJ} = k,$$

то получим дифференциальное уравнение упругой линии:

$$u + \frac{d^2 u}{d\varphi^2} = k r_m (1 + \cos \varphi), \quad (8)$$

общий интеграл которого, как известно, имеет вид

$$u = A \cos \varphi + B \sin \varphi + k r_m \left(1 + \frac{\varphi}{2} \sin \varphi\right). \quad (9)$$

Постоянные A и B получаются из краевых условий. Если предполагается, например по Свифту [2], кольцо, закрепленное в сечении, противоположащем замку, то в месте заделки при $\varphi = 0$ и $u = 0$, поэтому $A = k r_m$. Далее, в той же точке при $\varphi = 0$ имеем $du/d\varphi = 0$, поэтому $B = 0$ и, наконец, снова получаем

$$u = k r_m \left(1 - \cos \varphi + \frac{\varphi}{2} \sin \varphi\right).$$