

УДК 621.7.015
DOI:10.30987/2223-4608-2021-6-18-23

А.В. Тотай, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: totai_av@mail.ru

Технологическое повышение долговечности поршневых колец двигателей внутреннего сгорания

Рассмотрены вопросы применения в качестве неразрушающего метода контроля поверхностного слоя поршневых колец двигателей внутреннего сгорания экзоэлектронной эмиссии. Установлены связи этого параметра с методами и условиями механической обработки поршневых колец и на этой основе даны рекомендации по оптимизации операционной технологии их изготовления.

Ключевые слова: эпора радиальных давлений; экзоэлектронная эмиссия; маршрут обработки; композиционные инструменты.

A.V. Totay, Dr. Sc. Tech.
(FSBEI HE «Bryansk State Technical University», 7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Technological life increase of ICE piston rings

The problems of nondestructive inspection method use for piston rings of internal combustion engines of exoelectronic emission are considered. The ties of this parameter with the methods and conditions of piston ring machining are defined and on this basis there are given recommendations for the optimization of an operation technology of their manufacturing.

Keywords: diagrams of radial pressures; exoelectronic emission; working route; composite tools.

Поршневые кольца являются деталями двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые определяют надежность и долговечность всей энергоустановки. Повышенное внимание к этим деталям определяется в настоящее время ростом требований к удельным мощностям, экономическим и экологическим показателям ДВС.

Поршневые кольца представляют собой криволинейные плоские пружины, сжатые до небольшого зазора между концами и принимающие в упругом состоянии форму окружности цилиндра двигателя. Они свободно располагаются в канавке поршня, плотно прилегая образующей к поверхности цилиндра, а одним из торцов – к плоскости канавки поршня.

Поршневые кольца должны выполнять следующие функции:

- 1) обеспечивать необходимое динамическое уплотнение камеры поршня при возможно минимальных потерях на трение;
- 2) отвод части тепла от поршня;
- 3) распределение смазки между трущимися поверхностями цилиндропоршневой группы и

отвод излишек масла в картер двигателя.

Уплотнение камеры сгорания – основная функция поршневых колец. В конце такта сжатия рабочей смеси давление в современных карбюраторных двигателях достигает 3...4 МПа, а в дизельных 5...7 МПа. При вспышке сжатой смеси эти параметры могут достигать 8...12 МПа. Поршневые кольца испытывают при этом воздействие сил давления газов, сил собственной упругости, сил трения и сил инерции. Установлено, что высокое давление газов действует лишь в небольшой отрезок времени, который, например, для четырехтактного двигателя, составляет всего 1/10...1/12 цикла по углу поворота коленчатого вала. Поэтому одним из важнейших моментов является выбор радиальных давлений кольца, создаваемых вследствие собственной упругости. Этой характеристикой определяется основное условие работы кольца – сохранение контакта с цилиндром на протяжении всего рабочего цикла двигателя. О качественной стороне этого контакта судят обычно визуально – по светопроницаемости между поршневым кольцом и контрольным кольцом

– калибром с диаметром, соответствующим диаметру цилиндра двигателя.

Наиболее часто встречающейся причиной выхода из строя поршневых колец, обуславливающей повышение расхода топлива, масла и снижение КПД, является так называемый "провис", т.е. появление радиальных зазоров на концах кольца у замка. Для уменьшения вероятности появления таких зазоров, поршневое кольцо должно обладать определенной приспособляемостью, т.е. способностью сохранения непрерывного контакта с поверхностью цилиндра в процессе эксплуатации. Это обеспечивается подбором конструкционных материалов, расчетом необходимых сил упругости, геометрии, а главное выбором определенного закона (эпюры) распределения радиальных давлений по периметру. В зависимости от типа двигателя, его скоростных характеристик и развиваемой мощности в практике двигателестроения существует множество видов эпюр радиальных давлений кольца на стенку цилиндра.

Для большинства быстроходных двигателей предпочитают грушевидную эпюру (рис. 1) с коррекцией давления у замка по отношению к среднему давлению в пределах 1,4...1,6 [1].

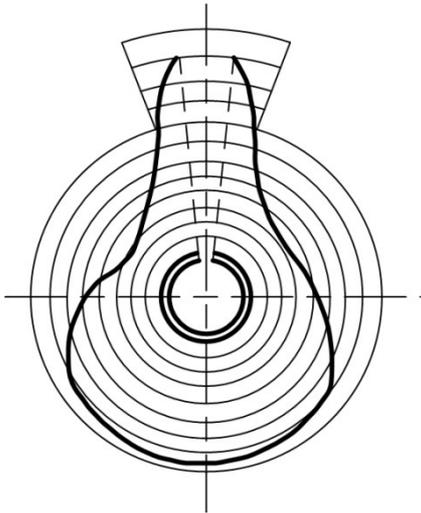


Рис. 1. Грушевидная эпюра радиальных давлений поршневого кольца на гильзу цилиндра

Получение заданной эпюры радиальных давлений обеспечивается соответствующим технологическим процессом (ТП). Так, формирование грушевидной эпюры радиальных давлений поршневых колец происходит в результате реализации следующей последовательности технологических операций, содержание которых приведено в табл. 1.

1. Последовательность механической обработки чугунных поршневых колец

№ п/п	Содержание операции
1	Черновая круглая обточка и расточка
2	Разрезка маслота на заготовки
3	Закалка и отпуск
4	Черновое шлифование торцов
5	Чистовое шлифование торцов
6	Копирная обточка и расточка
7	Вырезка замка
8	Черновая калибровка замка
9	Чистовая круглая обточка и расточка
10	Чистовая калибровка замка
11	Профилирование
12	Притирка перед хромированием
13	Притирка после хромирования

Несмотря на массовый характер производства поршневых колец, обуславливающий применение специального станочного оборудования и оснастки, эпюры радиальных давлений могут в значительной степени отличаться от изделия к изделию. Это может быть связано как с нестабильностью механических свойств чугуна при различных плавках, так и с серьезными искажениями "запрограммированной" эпюры в процессе механической обработки. Очевидно, в процессе технологического воздействия на рабочие поверхности поршневого кольца эта деталь, имеющая очень малую собственную жесткость, будет чутко реагировать на напряженное состояние металла поверхностного слоя [2, 3].

Причем, если технологические остаточные напряжения в условиях эксплуатации при повышенных температурах довольно быстро релаксируют, то наклеп, как реакция на пластическую деформацию, будет оказывать влияние в процессе довольно значительного периода работы поршневых колец. Для проверки данной гипотезы были исследованы в производственных условиях Клиновского завода поршневых колец 100 компрессионных колец диаметром 150 мм, на которых определена радиальная эпюра давлений по 11-ти точкам (рис. 2) и затем измерен уровень экзоэмиссионного тока, как комплексно оценивающий физико-механическое состояние поверхностного слоя и имеющий тесную корреляционную связь с характеристиками наклепа.

Как видно из рис. 2, наиболее близкую к теоретической форму эпюры радиальных давлений имеет у кольца с минимальной поверхностной энергией на рабочей цилиндрической поверхности. И наоборот, более искажена

эпюра кольца с уровнем экзоэмиссии, имеющем максимальное среднее значение в исследованной выборке. Этот факт позволяет сделать вывод о целесообразности минимизации изменения физико-механических свойств поверхностного слоя для такой специфической детали, как поршневое кольцо.

Нестабильность уровня поверхностной экзоэмиссии, а следовательно, и эпюры радиальных давлений даже в пределах одной партии обрабатываемых заготовок объясняется двумя основными причинами: колебания припуска на обработку на копирной обточке; прогрессирующий износ режущего инструмента в течение заданного периода стойкости в процессе копирного и чистового обтачивания.

Если первая причина носит случайный характер и при любом уровне технологии будет иметь место, то вторая, относящаяся к систематически действующим факторам, может быть и прогнозируема, и управляема.

Очевидно, что применение более износостойкого инструментального материала должно в определенной степени повысить стабильности физико-механических свойств поверхностного слоя. Для этой цели на рассматриваемой стадии изготовления поршневых колец были применены резцы из синтетического

сверхтвердого материала (СТМ) марки композит 10. Результаты этих сравнительных экспериментов приведены в табл. 2.

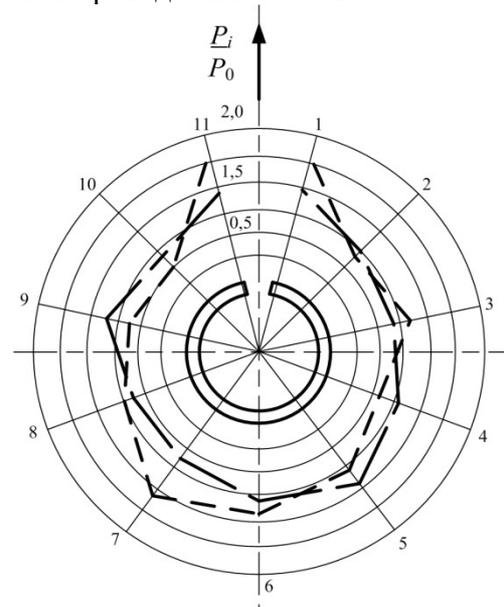


Рис. 2. Влияние энергетического состояния поверхностного слоя поршневых колец на характер эпюры радиальных давлений:

----- $\bar{J} = 107,3$; ———— $\bar{J} = 296,7$ (после притирки перед хромированием). Материал колец: специальный модифицированный чугун А.с. 1158609 [3].

2. Условия обработки и характеристики поверхностного слоя поршневых колец

Марка инструмента	Вид обработки	Условия обработки, характеристики поверхностного слоя поршневых колец					
		<i>t</i> , мм	<i>S</i> , мм/об	<i>v</i> , м/мин	<i>r</i> , мм	<i>h₃₂</i> , мм	<i>I</i> , с ⁻¹
ВК6	Копирное обтачивание	2,0	0,18	40	0,11	0,44	339
	Чистовое обтачивание	0,6	0,10	51	0,84	0,36	282
Композит 10	Копирное обтачивание	2,0	0,18	40	0,09	0,12	168
	Чистовое обтачивание	0,6	0,10	80	0,81	0,08	123

Анализируя приведенные данные, можно сказать, что применение резцов из композита 10 дает значительно меньшие значения параметра *I*, чем обработка твердым сплавом. Так, при копирном обтачивании экзоэмиссия меньше в 2 раза, а при чистовом – в 2,3 раза.

Как показывает практика изготовления поршневых колец, большое значение на стабильность эпюры радиальных давлений и герметичность камеры сгорания в процессе эксплуатации оказывает финишная стадия технологического процесса. Задачей этой стадии обработки является создание более благоприятного микрорельефа рабочей поверхно-

сти кольца перед хромированием и притирка изделия в инструменте-цилиндре, а также съем дендридов после хромирования и обеспечения заданной шероховатости.

В подавляющем большинстве случаев притирка как до хромирования, так и после осуществляется на хонинговальных станках. Инструментом на этой операции служит гильза, покрытая слоем искусственных алмазов. Пакет колец, набираясь в специальном стакане, вращается с частотой 15...20 об/мин и совершает возвратно-поступательные движения в гильзе со скоростью 5...8 м/мин.

К недостаткам этого метода относится то,

что усилие хонингования распределяется по рабочей поверхности кольца неравномерно, а в соответствии со сформированной к данному этапу техпроцесса эпюрой радиальных давлений. Это неизбежно приводит и к неравномерности съема припуска и искажает эпюру радиальных давлений. Более того, так как кольца на подвеске находятся в инструментальной гильзе в свободном состоянии, то для грушевидных эпюр радиальных давлений наиболее интенсивной обработке подвергаются участки рабочей поверхности колец у замка, что заведомо снижает их долговечность. Обработка же пакета колец в сжатом по торцам состоянии исключает преждевременный износ концов кольца, но имеет не менее существенный недостаток: не позволяет кольцу приработаться к цилиндру под действием собственных сил упругости, что в значительной степени увеличивает период приработки в процессе эксплуатации и уменьшает герметичность камеры сгорания двигателя.

Для исключения указанных недостатков была предложена специальная конструкция [4] для притирки поршневых колец. Принцип работы этого механизма заключается в обработке в гильзе-притире сжатого по торцам пакета колец при возвратно-поступательном и вращательном движении, и автоматического роспуска пакета в нижней и верхней точках положения штока. Подобная кинематика исключает повышенный объем припуска в районе замка за счет большего радиального давления по закону грушевидной эпюры.

В производственных условиях готовые поршневые кольца подвергаются 100 %-ному контролю «на просвет». Схема контрольного устройства по ГОСТ 621-87 представлена на рис. 3. На нем контролируется толщина просвета (в нашем случае максимально допустимая 0,02 мм) и дуга просвета в угловой мере. Причем, последний параметр определяется коэффициентом K_n (%), равным отношению суммарной дуги просвета к длине окружности поршневого кольца.

На рис. 4 приведены результаты контроля «на просвет» двух партий компрессионных и двух партий маслосъемных колец количеством по 50 шт. в каждой, обработанных по маршруту, приведенному в табл. 1.

Под серийным ТП здесь понимается вариант обработки с применением твердосплавных резцов и притирку на оправке со свободным расположением поршневых колец.

Новый ТП характеризуется использованием лезвийного инструмента из СТМ – композит

и специальную оправку для притирки, описанную выше и защищенную авторским свидетельством.

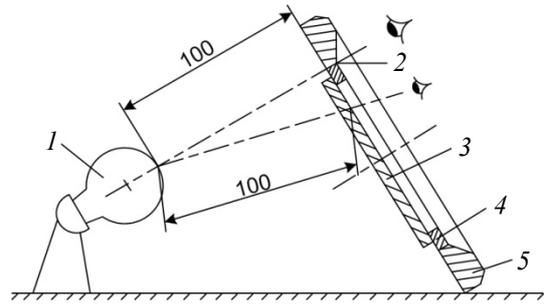


Рис. 3. Принципиальная схема контроля радиального зазора поршневого кольца по ГОСТ 621-87:

1 – источник освещения; 2 – эталонная щель; 3 – непрозрачный экран; 4 – контролируемое кольцо; 5 – контрольный калибр

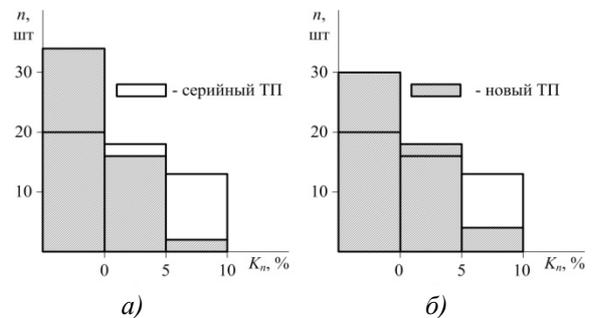


Рис. 4. Сравнительная оценка вариантов изготовления компрессионных (а) и маслосъемных (б) поршневых колец по величине радиального зазора

Анализируя данные этого эксперимента, можно утверждать, что как для компрессионных, так и для маслосъемных колец усовершенствованный технологический процесс их обработки обеспечивает значительное увеличение так называемых "беспросветных" колец (компрессионных с 20 до 32; маслосъемных с 21 до 30). Причем, его увеличение происходит в основном за счет соответствующего уменьшения количества колец, имеющих коэффициент $K_n = 5...10$. Этот факт особенно важен, так как именно $K_n = 5\%$ для многих типов колец является предельно допустимым.

Подобное качественное изменение показателей процессов объясняется двумя основными причинами:

- 1) минимизацией деформационных изменений в поверхностном слое колец и, следовательно, максимальным приближением реальной эпюры радиальных давлений к заданной;
- 2) обеспечение равномерного съема припуска на финишной стадии ТП за счет приме-

нения предложенного устройства, что способствует минимальному искажению теоретической эпюры и лучшей прирабатываемости кольца к инструменту-гильзе.

Для сравнения износостойкости серийных и исследуемых поршневых колец были приведены стендовые испытания на безмоторной установке с автоматической регулировкой температуры в цилиндре 40...200 °С. Привод коленчатого вала осуществлялся синхронным электродвигателем мощностью 10 кВт при $n = 1460$ об/мин через автомобильную пятиступенчатую коробку перемены передач.

Доминирующей причиной выхода из строя поршневого кольца является его радиальный износ [5].

В случае принятия допущения о равномерности износа по контуру его величина может быть определена с помощью выражения:

$$\Delta_U = (S_2 - S_1) / 2\pi,$$

где S_1, S_2 – начальное и конечное значение раствора замка. Величины S_1 и S_2 определялись с помощью инструментального микроскопа УИМ21 в кольце-калибре $\varnothing 150H5$.

Кроме определения износа поршневого кольца по конечному раствору замка, износ также определялся в семи точках рабочей поверхности. Испытания проводились в условиях граничного трения в режиме капля масла МТ-16П на 500 м пути, длительность испытаний – 50 ч. Устанавливалось одновременно два кольца на один поршень. В качестве объектов исследования были приняты компрессионные конусные кольца, стандартные параметры шероховатости поверхностей, которых в результате обработки по обоим маршрутам ТП были следующие: $Ra = 0,48...0,54$ мкм; $S_m = 0,056...0,062$ мм; $t_m = 51...55$ %. Контртелом служила хонингованная чугунная гильза с $Ra = 0,32$ мкм. Каждая серия экспериментов повторялась 5 раз, и все экспериментальные точки являются усредненными из 5 значений.

На рис. 5 представлены кривые износа поршневых колец в зависимости от времени работы безмоторной установки, из которых видно, что для двух температурных режимов износ колец, изготовленных по предложенной схеме, меньше, чем у серийных колец.

Причем, с увеличением температуры теплоносителя с 80 до 140 °С эта разница в износе в среднем возрастает с 13 % до 17 %. Уменьшение износа колец, обработанных с применением сверхтвердых материалов и специальной оснастки, при притирке обеспечило

большее приближение к теоретической эпюре радиальных давлений и большую площадь контакта кольца с гильзой цилиндра. Увеличение температуры испытаний способствует увеличению износа за счет более интенсивного коксования масла, частицы которого играют роль свободного абразива.

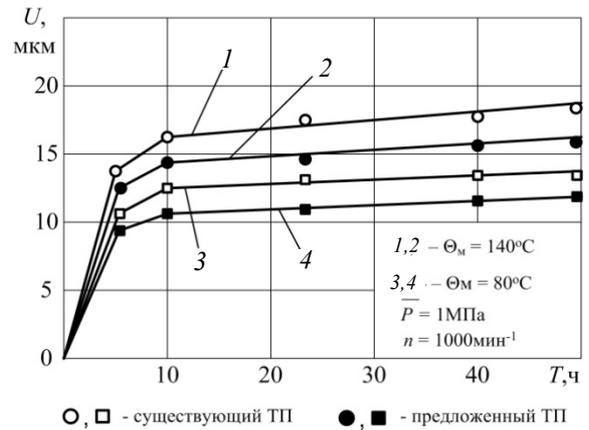


Рис. 5. Зависимости износа компрессионных нехромированных колец от времени работы

Износ колец по периметру, измеренный в семи точках (рис. 6) после 50 часов испытаний, показывает его неоднородный характер. Наибольший износ наблюдается на концах колец у замка, т.е. участках, имеющих наибольшее давление.

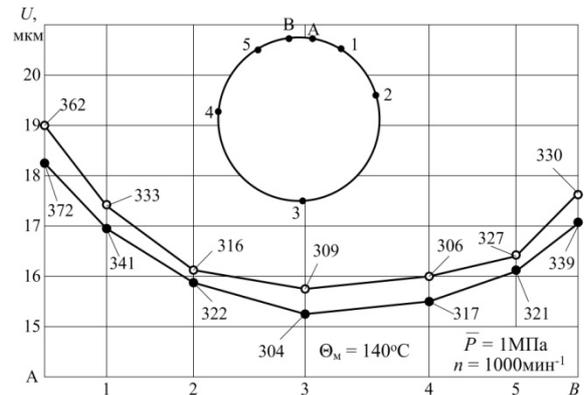


Рис. 6. Характер износа рабочей поверхности поршневых колец по периметру. Цифрами указаны усредненные значения эксоземиссии

После исследования износа из этих же колец вырезались образцы на соответствующих участках для измерения уровня эксоземиссии (ЭЭЭ). Эти экспериментальные данные показывают общую тенденцию к увеличению поверхностной энергии на участках колец, имеющих наибольший износ, что каса-

ется сравнения экзотока по периметру деталей, обработанных различными способами, то здесь какой-либо четкой закономерности не прослеживается, и разница в значениях по каждому из исследованных сечений соизмерима с погрешностями метода ЭЭЭ.

Проведенные лабораторные, стендовые и производственные испытания убедительно подтвердили преимущество рекомендованного варианта техпроцесса изготовления чугунных поршневых колец с использованием инструментов из композитов, синтетических алмазов и специальной оснастки. Увеличение долговечности колец составляет до 18 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тотай, А.В., Акулич, П.П., Поплавский, А.М. Оптимизация маршрута обработки поршневых колец дизельных двигателей по критерию беспробности. В сб. «Повышение экономичности ДВС». – М.: ЦНИИТЭИ Тракторсельмаш, 1986. – вып.1. – с. 23-24.
2. Тотай, А.В., Акулич, П.П., Михеенко, Т.А. Оценка износостойкости поршневых колец по физическим критериям. В сб. «Износ в машинах и методы защиты от него». – М.: ИМАШ, 1985. – с. 129-131.
3. Тотай, А.В., Поплавский, А.М., Пыриков, И.Л. Оптимизация промежуточной и финишной стадий обработки рабочей поверхности поршневых колец. В сб. «Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин». – Брянск: БИТМ, 1988. – с. 130-136.

4. Поплавский, А.М., Тотай, А.В., Акулич, П.П. Устройство для притирки поршневых колец. А.С. СССР №1256932.15.05. 1986 г.

5. Тотай, А.В., Тихомиров, В.П., Савин, Л.А. Технологическое обеспечение износостойкости чугунных поршневых колец // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – №2-2 (292). – С. 74-80.

REFERENCES

1. Totay, A.V., Akulich, P.P., Poplavsky, A.M. Route optimization in diesel engine piston ring machining by gapless criterion. In *“ICE Effectiveness Increase” collection*. – M.: CRITEI Tractorselmach, 1986. – issue 1. – pp. 23-24.
2. Totay, A.V., Akulich, P.P., Mikheenko, T.A. Estimate of piston ring wear-resistance by physical criteria. In *“Machine Wear and Wear-resistance Methods” collection*. – M.: IMACH, 1985. – pp. 129-131.
3. Totay, A.V., Poplavsky, A.M., Pyrikov, I.L. Optimization of intermediate and finishing stages in working surface processing in piston rings. In *“Technological Support of Machinery Operation Properties” collection*. – Bryansk: BITM, 1988. – pp. 130-136.
4. Poplavsky, A.M., Totay, A.V., Akulich, P.P. *Device for Piston Ring Lapping*. A.C. the USSR No.1256932.15.05. 1986.
5. Totay, A.V., Tikhomirov, V.P., Savin, L.A. Technological support of wear-resistance in cast-iron piston rings // *Fundamental and Applied Problems in Engineering and Technology*. – 2012. – No.2-2 (292). – PP. 74-80.

Рецензент д.т.н.
Михаил Львович Хейфец

