

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.923.5
doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-4-12

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Анатолий Васильевич Тотай^{1✉}, Виталий Сергеевич Селифонов²

^{1,2} Брянский государственный технический университет: 241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7.

¹ totai_av@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

² vitalserg82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-2915>

Аннотация

Продолжающееся совершенствование двигателей внутреннего сгорания самого различного назначения предполагает изыскание конструкторских и технологических методов повышения их эксплуатационных характеристик. К традиционным требованиям по надежности, долговечности и экономичности в последнее время на одно из первых мест выходит требование по экологичности, так как в большинстве крупных городов как бензиновые, так и дизельные двигатели являются основными источниками неблагоприятного состояния окружающей среды. Интенсивное внедрение двигателей, не связанных с использованием топлив на основе нефти, будет происходить в тридцатые годы нынешнего столетия и, следовательно, еще как минимум десятилетие жителям городов придется иметь дело с проблемами загрязнения воздушной среды. В статье рассмотрены вопросы повышения надежности и долговечности поршневых колец двигателей внутреннего сгорания на основе совершенствования технологии их изготовления и методов контроля, основанных на комплексном учете и оценке упругих свойств данного класса, определяющего эффективность всей энергоустановки. На

основе анализа существующих технологических процессов изготовления чугуновых поршневых колец выявлены резервы более надежного обеспечения заданной эпюры радиальных давлений поршневого кольца на гильзу цилиндра. Данный положительный эффект удалось получить за счет применения современных лезвийных режущих инструментов на основе кубического нитрида бора и физического метода контроля упругого состояния поршневого кольца, основанного на определении энергетического состояния поверхностного слоя изделия. Подобные исследования основаны на использовании метода экзэлектронной эмиссии (ЭЭЭ), способного реагировать на изменение физико-механических параметров поверхностного слоя поршневых колец. Проведенные испытания на износостойкость подтвердили возможность внесения коррективов в технологию изготовления и повысить эксплуатационные характеристики поршневых колец.

Ключевые слова: эпюра, давление, экзэлектронная эмиссия, маршрут, обработка, композиционные инструменты.

Ссылка для цитирования:

Тотай А.В. Технологическое повышение долговечности поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / А.В. Тотай, В.С. Селифонов // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 5. – С. 4–12. doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-4-12.

Original article
Open Access Article

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF DURABILITY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTON RINGS

Anatoly Vasilyevich Totay^{1✉}, Vitaly Sergeevich Selifonov²

^{1,2} Bryansk State Technical University: 7, 50-let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035, Russia.

¹ totai_av@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

² vitalserg82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-2915>

The ongoing improvement of internal combustion engines of various types involves the search for design and technological methods to improve their operational characteristics. In addition to the traditional requirements for reliability, durability and efficient performance, the requirement for environmental friendliness has recently taken one of the first places, since in many large cities both gasoline and diesel engines are the main sources of the unfavorable state of the environment. Intensive introduction of engines that are not related to the use of oil-based fuels will occur in the thirties of this century and, consequently, for at least another decade, urban residents will have to deal with air pollution problems. The paper considers the issues of increasing the reliability and durability of piston rings of internal combustion engines based on the improvement of their manufacturing technology and control methods based on comprehensive consideration and evaluation of elastic properties of this class, which

determines the efficiency of the entire power plant. The analysis of existing technological processes of manufacturing cast-iron piston rings underlies the discovery of reserves for more reliable provision of a given diagram of the piston ring radial pressures on the cylinder liner. This positive effect was achieved through the use of modern edge cutting tools based on cubic boron nitride and a physical method for controlling the elastic state of the piston ring, based on defining the energy state of the surface layer of the product. Such studies are based on the use of the method of exoelectronic emission (EEE), capable of responding to changes in the physical and mechanical parameters of the surface layer of piston rings. The wear resistance tests carried out confirmed the possibility of making adjustments to the manufacturing technology and improving the performance characteristics of piston rings.

Keywords: diagram, pressure, exoelectronic emission, route, machining, composite instruments.

Reference for citing:

Totai A.V., Selifonov V.S. Technology improvement of durability of internal combustion engine piston rings. Transport Engineering. 2022;5:4-12 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-4-12.

Введение

Постоянно повышающиеся требования к мощностям, экологическим и экономическим показателям двигателей внутреннего сгорания (ДВС) предполагают особое внимание конструкторов и технологов к поршневым кольцам, которые, как подтверждают многочисленные данные [1, 2, 3], определяют надежность и долговечность всей энергоустановки.

По конструктивным особенностям эти детали представляют собой криволинейные плоские пружины, сформированные до небольшого зазора между концами и принимающие форму круга, наружный диаметр которого равен диаметру окружности цилиндра двигателя или компрессора.

Поршневые кольца свободно располагаются в канавке поршня, прилегая за счет собственных сил упругости к поверхности цилиндра, а одним из торцов к стенке канавки поршня. Эти детали должны выполнять следующие функции [4, 5]:

1. Создавать необходимое уплотнение в динамике камеры поршня при обеспечении минимальных потерь на трение;
2. Отвод максимально возможного количества тепла от поршня к охлаждаемой рубашке блока цилиндров;
3. Регулирование объема смазки между трущимися поверхностями цилин-

дропоршневой группы и сброс излишек масла в картер двигателя.

Из перечисленных выше функций поршневых колец основной можно считать уплотнение камеры сгорания. В момент окончания такта сжатия рабочей смеси давление в карбюраторных двигателях достигает 3...4 МПа, а в дизельных 5...7 МПа. При вспышке эти параметры могут достигать до 12 МПа. При этом поршневые кольца подвергаются воздействию давления газов, сил собственной упругости, сил трения, а также сил инерции.

Установлено, что высокое давление газов действует лишь в небольшой промежуток времени, который, например, для четырехтактного двигателя, составляет 1/10...1/12 оборота 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 светопрозрачности 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 к.п.д., 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 поверхно-

Результаты и обсуждение

В большинстве быстроходных двигателей используют грушевидную эпюру (рис. 1) с коррекцией давления у замка по отношению к среднему давлению в пределах 1,4...1,6 [6, 7].

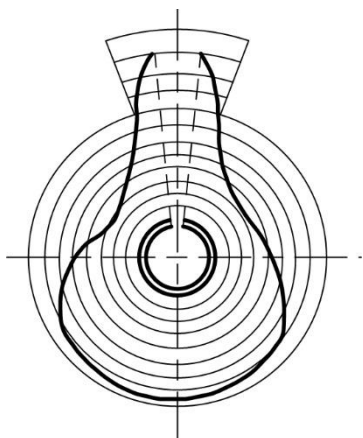


Рис. 1. Грушевидная эпюра радиальных давлений поршневого кольца на гильзу цилиндра

Fig. 1. Pear-shaped diagram of radial pressures of the piston ring on the cylinder liner

Заданная эпюра радиальных давлений обеспечивается соответствующим технологическим процессом обработки маслотно заготовок на специальных токарных копировальных полуавтоматах (табл. 1).

В подавляющем большинстве случаев изготовление поршневых колец по типу производства носит крупносерийный или массовый характер. По этой причине практически невозможно обеспечить стабильные упругие свойства многотысячных партий поршневых колец вследствие колебаний химического состава и механических характеристик используемых марок чугунов, а также искажением заданной эпюры радиальных давлений в процессе механической обработки.

стью цилиндра в процессе эксплуатации. Это обеспечивается подбором конструктивных материалов, расчетом необходимых сил упругости, геометрии и, главное, выбором определенного закона (эпюры) распределения радиальных давлений по периметру. В практике двигателестроения существует несколько типов эпюр радиальных давлений кольца на стенку цилиндра в зависимости от вида двигателя и его технических характеристик.

Таблица 1
Последовательность механической обработки чугуновых поршневых колец
Table 1

Machining sequence of cast iron piston rings

№ п/п	Содержание операции
1	Черновая круглая обточка и расточка
2	Разрезка маслот 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

Особую проблему обеспечения стабильных свойств колец создает то обстоятельство, что сама заготовка изделия имеет очень малую собственную жесткость и многократное воздействие на нее силовых и температурных факторов в процессе обработки может существенно нарушить «запрограммированную» эпюру радиальных давлений [8, 13, 14].

Нарушать запрограммированную эпюру радиальных давлений будут упругопластические свойства рабочих поверхностей изделий. Сформированные в процессе технологического воздействия остаточные напряжения первого ряда под влиянием очень высоких температур в период эксплуатации неизбежно будут быстро релаксировать. Что касается наклепа, характеризующего степень пластической деформации металла поверхностного слоя, то он будет оказывать влияние на эксплуатационную надежность колец достаточно длительный период времени.

Проверка предложенной гипотезы осуществлялась в реальных производственных условиях Клиновского завода поршневых колец. Из очередной партии чугунных поршневых колец $\varnothing 150$ мм были отобраны случайным образом 100 компрессионных колец, для которых по соответствующему стандарту построены эпюры радиальных давлений (рис. 2) и в тех же сечениях измерен уровень тока экзоэмиссионного характера, используемого в качестве комплексного параметра оценки физико-механического состояния поверхностного слоя и имеющего корреляционную связь с наклепом на ниже 0,8 [9, 10, 15].

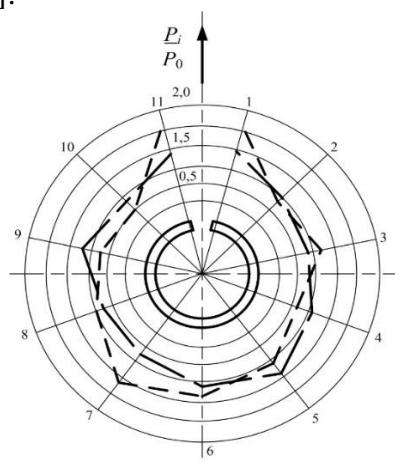


Рис. 2. Влияние энергетического состояния поверхностного слоя поршневых колец на характер эпюры радиальных давлений: — — — — — $\bar{J} = 107,3$; — — — — — $\bar{J} = 296,7$ (после притирки перед хромированием)

Материал колец: модифицированный чугун

Fig. 2. Influence of the energy state of piston ring surface layer on the character of the radial pressure diagram: — — — — — $\bar{J} = 107.3$; — — — — — $\bar{J} = 296.7$

(after lapping before chrome plating).

Ring material: modified cast iron

Представленные изображения эпюр радиальных давлений свидетельствуют, что наиболее близкую к заданной имеют поршневые кольца с минимальной поверхностной энергией на цилиндрической рабочей поверхности изделия. Картина радиальных давлений партии колец с более значительными уровнями энергии являются искаженными и не соответствующими требованиям технических условий.

Приведенная объективная физическая картина позволяет сделать вывод о необходимости минимизации дрейфа упругопластических параметров поверхностного слоя колец. Отсутствие стабильности технологического обеспечения в производственных условиях заданной эпюры радиальных давлений может быть объяснено двумя объективными причинами:

1. неизбежность колебания припуска при копирных обработках;
2. износ режущего инструмента в период от начала его эксплуатации до его замены.

Очевидно, что первая причина носит случайный характер и будет иметь место при любом уровне технологии и станкоинструментального оснащения. Вторая же причина является систематически действующим фактором и может быть рассчитана и, следовательно, управляема.

Стабильность обеспечения эксплуатационных свойств поршневых колец технологическими методами может быть существенно повышена за счет применения резцов из синтетических сверхтвердых материалов. Результаты сравнительных экспериментов, подтверждающих правомерность предложенного подхода, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Условия обработки и характеристики поверхностного слоя поршневых колец

Table 2

Processing conditions and characteristics of the surface layer of piston rings

Марка инструмента	Вид обработки	Условия обработки характеристики поверхностного слоя поршневых колец					
		t , мм	S , мм/об	V , м/мин	r , мм	h_3 , мм	I , c^{-1}
BK6	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

Как показывает практика изготовления поршневых колец, большое значение на стабильность эпюры радиальных давлений и, соответственно, уровень компрессии в камере сгорания оказывает финишная стадия технологического процесса. Целью этой отделочной стадии обработки является обеспечение заданной шероховатости поверхности кольца перед хромированием и притирка изделия, а также удаление дендритов после хромирования и обеспечение регламентированной чертежом и ТУ шероховатости.

Операции притирки осуществляются как до хромирования, так и после. Станочным оборудованием служат серийные хонинговальные станки. Обработке подвергается пакет колец, набранный в специальном стакане, внутренний диаметр которого равен номинальному диаметру цилиндра двигателя. Частота вращения при притирке 15-20 об/мин, скорость возвратно-поступательного движения 5-8 м/мин.

Подобная организация финишной операции имеет существенный недостаток, связанный с различным давлением по окружности колец, что неизбежно приводит к неравномерности съема припуска и искажает эпюру, заложенную на копирных обработках. Эта проблема особенно остро проявляется при изготовлении колец с грушевидной эпюрой, у которой наибольший припуск снимается у замка, что неизбежно приводит к значительному сниже-

нию их эксплуатационных показателей. Попытки осуществить притирку пакетов колец в сжатом по торцам состоянии не позволяет кольцу приработаться к цилиндру под действием собственных сил упругости, что существенно увеличивает время приработки в начальном процессе эксплуатации.

Для исключения указанных недостатков была предложена специальная конструкция [11] 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 дуге просвета к длине окружности поршневого кольца.

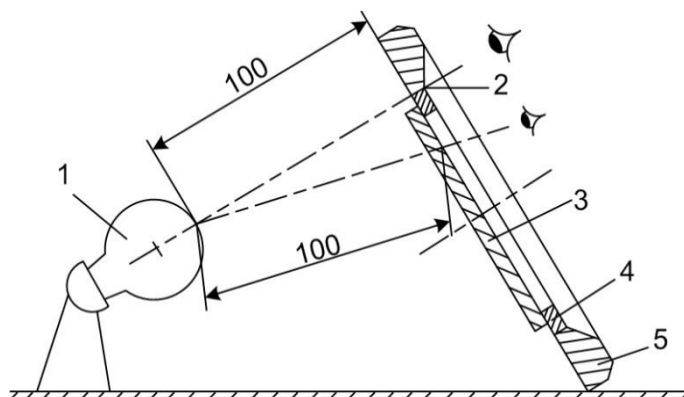


Рис. 3. Принципиальная схема контроля радиального зазора поршневого кольца по ГОСТ 621-87: 1 – источник освещения, 2 – эталонная щель, 3 – непрозрачный экран, 4 – контролируемое кольцо, 5 – контрольный калибр
 Fig. 3. Schematic diagram to control the radial gap of the piston ring according to GOST 621-87: 1 – lighting source, 2 – reference slit, 3 – opaque screen, 4 – controlled ring, 5 – control gauge

На рис. 4 приведены результаты контроля «на просвет» двух партий компрес-

сионных и двух партий маслосъемных колец количеством по 50 штук в каждой, об-

работанных по маршруту, приведенному в табл. 1. Под серийным ТП здесь понимается вариант обработки с применением твер-

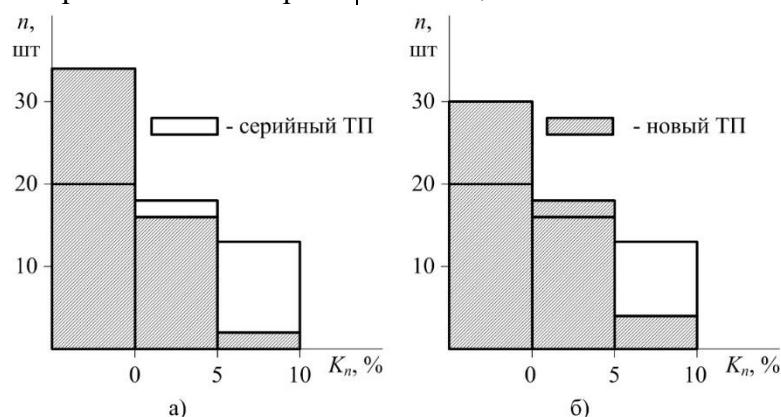


Рис. 4. Сравнительная оценка вариантов изготовления компрессионных а – маслосъемных; б – поршневых колец по величине радиального зазора
 Fig. 4. Comparative evaluation of manufacturing compression a – oil-control; b – piston rings by the size of the radial gap

Новый ТП характеризуется использованием лезвийного инструмента из СТМ - композит 10 и специальную оправку для притирки, описанную выше и защищенную авторским свидетельством [11].

Данные проведенного эксперимента подтверждают значительное увеличение так называемых «беспросветных» колец обоих видов, что связано, в основном, с уменьшением количества колец с K_n до 10% и перехода их в категорию «беспросветных». Этот факт имеет существенное технико-экономическое значение, т.к. $K_n=5\%$ для многих типов колец является предельно допустимым.

Подобное качественное изменение показателей процессов объясняется двумя основными причинами:

а – минимизацией деформационных изменений в поверхностном слое колец и, следовательно, максимальным приближением реальной эпюры радиальных давлений к заданной;

б – обеспечение равномерного съема припуска на финишной стадии ТП за счет применения предложенного устройства, что опять же 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

досплавных резцов и притирку на оправке со свободным расположением поршневых колец.

40...200 °С. Привод коленчатого вала осуществлялся синхронным электродвигателем мощностью 10 кВт при $n = 1460$ об/мин через автомобильную пятиступенчатую коробку перемены передач.

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что главной причиной выхода из строя поршневого кольца является его радиальный износ Δ_U , который с определенными допущениями может быть определен с помощью выражения:

$$\Delta_U = (S_2 - S_1) / 2\pi \quad (1)$$

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

На этих же образцах в семи точках рабочей цилиндрической поверхности, равномерно расположенной по окружности, определялась величина радиального износа.

Триботехнические испытания проводились в режиме граничного трения с использованием масла МТ-16П в количестве одна капля на 500 м пути. Длительность испытаний – 50 часов. Объектом исследования служили компрессионные кольца, параметры шероховатости которых после обработки по обоим маршрутам ТП были следующие: $Ra = 0,48-0,54$ мкм; $S_m = 0,056-0,062$ мм; $t_m = 51-55$ %. В качестве контртела использовалась 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 °С 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, следовательно, большую площадь контакта кольца с гильзой цилиндра. Увеличение температуры испытаний способствует увеличению износа при более интенсивном коксовании масла, частицы которого играют роль свободного абразива.

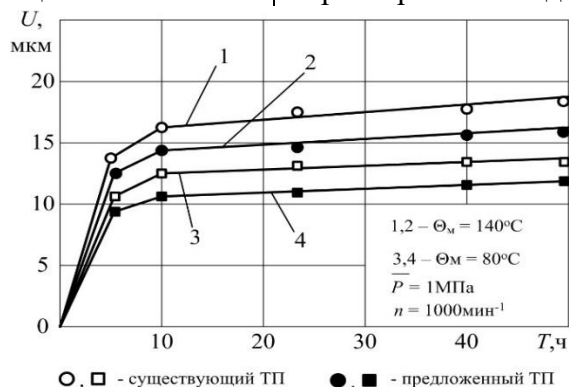


Рис. 5. Зависимости износа компрессионных хромонированных колец от времени работы
 Fig. 5. The dependence of the wear of compression non-chrome rings on the operating time

Радиальный износ по периметру кольца, измеренный в семи сечениях после полного цикла трибоиспытаний, показывает его значительную дисперсию (рис. 6). Наибольший износ установлен на свободных концах колец у замка, т.е. участках, обеспечивающих наибольшее радиальное давление.

На вырезанных образцах из этих же колец определялся уровень ЭЭЭ, который имел наибольшее значение на участках, имевших повышенный износ. Что касается экзотока по периметру колец, то какой-либо четкой функциональной закономерности не установлено и разница в их значениях соизмерима с погрешностями метода ЭЭЭ.

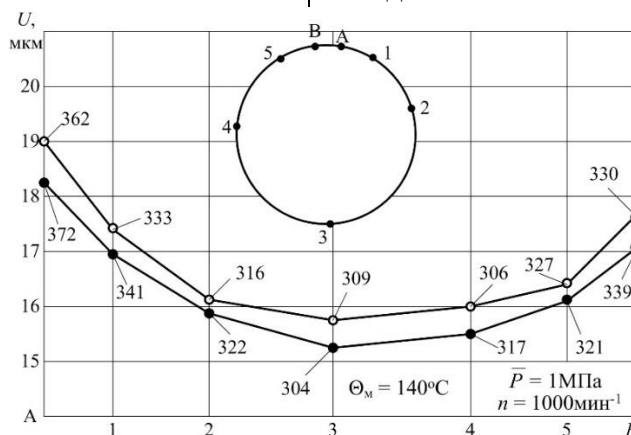


Рис. 6. Характер износа рабочей поверхности поршневых колец по периметру.
 Цифрами указаны усредненные значения экзэмиссии
 Fig. 6. The working surface wear of the piston rings along the perimeter.
 Figures indicate the average values of exoelectronic emission

Заключение

В результате проведенных исследований изменена существующая технология изготовления поршневых колец с применением на операциях копирного и чистового обтачивания вместо резцов из вольфрамкобальтовых сплавов на обработку резцами из композитов, что позволило повысить производительность на этих операциях в среднем на 35 % и стабилизировать упругие характеристики изделия и, соот-

ветственно, заданную эпоху радиальных давлений. Стандартный контроль колец по ГОСТ 621-87 зафиксировал значительный рост выхода годной продукции и обосновал дальнейшую отработку технологических процессов проводить с помощью неразрушающих методов контроля параметров поверхностного слоя. В нашей работе в качестве такого метода использована экзoeлектронная эмиссия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стечкин Б.С. Теория тепловых двигателей: монография. М.: Физматгиз, 2001. 428 с. ISBN 5-9221-0101-3.
2. Козловский В.Н. Исследование эксплуатационной надежности легковых автомобилей. *Автотранспорт: эксплуатация, обслуживание, ремонт*. 2012. №10. С. 20-23.
3. Saad P., Kamo L., Mekari M., Bryzik W., Wong V., Dmytrychenko N., Mnatsakanov R. Modeling and measurement of tribological parameters between piston rings-liner in turbocharged diesel engine. *Proceedings of STLE/ASME International Joint Tribology Conference*. 2006. P. 551-552. <https://doi.org/10.1115/IJTC2006-12308>.
4. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Метелев А.А., Пустовалов Ю.П. Моделирование параметров трения и износа цилиндропоршневой группы двигателя в реальном эксплуатационном цикле. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского ГПУ*. 2015. №1 (214). С. 22-28. DOI 10.5862 / JEST.214.3.
5. Wollmann D., Pintaude G. Tribological performance of high-strength cast iron in lubricated contact containing carbon black. *Wear*. 2021. Vol. 476 (203743). 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203743>
6. Nagar P., Miers S. Friction between piston and cylinder of an IC engine: A review. *SAE Technical Papers*. 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1405>.
7. Тотай А.В., Акулич П.П., Поплавский А.М. Оптимизация маршрута обработки поршневых колец дизельных двигателей по критерию беспроцентности. *Повышение экономичности ДВС: сб. науч. тр. М.: ЦНИИТЭИ тракторсельмаш, 1986. Вып.1. С. 23-24.*

8. 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 (293). С. 73-80.
9. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин: монография. М.: Машиностроение, 1988. 240 с. ISBN 5-217-00060-0.
10. **Тотай А.В.** Оценка износостойкости поршневых колец по физическим критериям. *Износ в машинах и методы защиты от него: сб. науч. тр. М.: ИМАШ, 1985. С. 129-131.*
11. Патент №1256932.15.05. СССР. Устройство для притирки поршневых колец, 1986. Поплавский А.М., Тотай А.В., Акулич П.П.
12. Schreer K., Roth I., Schneider S., Ehnis H. (2014). Analysis of aluminum and steel pistons-comparison of friction, piston temperature, and combustion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2014. Vol. 136. <https://doi.org/10.1115/JCE2013-19114>.
13. Кортов В.С., Слесарев А.И., Рогов В.В. Экзоэмиссионный контроль поверхности после обработки: монография. Киев: Наукова думка, 1986. 176 с.
14. Тотай А.В., Акулич П.П., Поплавский А.М. Применение экзoeлектронной эмиссии при оценке свойств поверхностного слоя деталей машин. *Экзоэмиссия и ее применение: сб. науч. тр. М.: МГУ, 1982. С.93-94.*
15. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Памфилов Ю.В. и др. Инженерия поверхности деталей: монография. М.: Машиностроение, 2008. 242 с. ISBN 978-5-217-03427-7.

REFERENCE

1. Stechkin B.S. Theory of heat engines. Moscow: Fizmatgiz; 2001.
2. Kozlovsky V.N. Research of operational reliability of cars. *Avtotransport: Ekspluatatsiya, Obsluzhivanie, Remont*. 2012;10:20-23.
3. Saad P, Kamo L, Mekari M, Bryzik W, Wong V, Dmytrychenko N, Mnatsakanov R. Modeling and measurement of tribological parameters between piston rings-liner in turbocharged diesel engine [In-

- ternet]. *Proceedings of STLE/ASME International Joint Tribology Conference*. 2006;551-552. Available from: <https://doi.org/10.1115/IJTC2006-12308>.
4. Shabanov A.Yu, Zaitsev A.B, Metelev A.A, Pustovalov Yu.P. Modeling of friction and wear parameters of the cylinder piston group of the engine in a real operational cycle. *Scientific and Science and technology STU Gazette*. 2015;1(214):22-28. DOI 10.5862 / JEST.214.3.

5. Wollmann D, Pintaude G. Tribological performance of high-strength cast iron in lubricated contact containing carbon black [Internet]. *Wear*. 2021;476(203743). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203743>
6. Nagar P, Miers S. Friction between piston and cylinder of an IC engine: A review [Internet]. *SAE Technical Papers*. 2011. Available from: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1405>
7. Totai A.V, Akulich P.P, Poplavsky A.M. Optimization of machining route of diesel engine piston rings by the criterion of hopelessness. Improving the efficiency of internal combustion engines: collection of scientific works M.: TSNIITEI traktorselmash.1986;1:23-24.
8. Totai A.V, Tikhomirov V.P, Savin L.A. Technological support of wear resistance of cast iron piston rings. *Fundamental and applied problems of Techniques and Technology*. 2012;2-2(293):73-80.
9. Sulima AM, Shulov VA, Yagodkin YuD. Surface layer and operational properties of machine parts. Moscow: Mashinostroenie; 1988.
10. Totai A.V. Evaluation of the wear resistance of piston rings by physical criteria. *Wear in machines and methods of protection against it: Collection of Scientific Works*; Moscow: IMASH; 1985:129-131.
11. Poplavsky A.M, Totai A.V, Akulich P.P. Patent no. 1256932.15.05. USSR. Device for lapping piston rings; 1986.
12. Schreer K, Roth I, Schneider S, Ehnis H. Analysis of aluminum and steel pistons-comparison of friction, piston temperature, and combustion [Internet]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2014;136. Available from: <https://doi.org/10.1115/ICEF2013-19114>
13. Kortov V.S, Slesarev A.I, Rogov V.V. Exoemission control of the surface after treatment. Kiev: Naukova dumka; 1986.
14. Totai A.V, Akulich P.P, Poplavsky A.M. The use of exoelectronic emission in assessing the properties of the surface layer of machine parts. Exoemission and its application: *Collection of Scientific Works*; Moscow: Moscow State University; 1982:93-94.
15. Suslov A.G, Bezyazichny V.F, Pamfilov Yu.V, et al. Engineering of workpiece surface. Moscow: Mashinostroenie; 2008.

Сведения об авторах:

Тотай Анатолий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. 8-910-743-51-85, e-mail: totai_av@mail.ru.

Totay Anatoly Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: 8-910-743-51-85, e-mail: totai_av@mail.ru.

Селифонов Виталий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. 8-952-961-81-22, e-mail: vitalserg82@mail.ru.

Selifonov Vitaly Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, phone: 8-952-961-81-22, e-mail: vitalserg82@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 30.03.2022; принята к публикации 21.04.2022. Рецензент – Мокрицкий Б.Я., доктор технических наук Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.03.2021; approved after review on 30.03.2022; accepted for publication on 21.04.2022. The reviewer is B.Ya. Mokritskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.