

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН СОЗДАНИЕМ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ТРЕНИИ

Г.И. Суранов, доцент кафедры ЛДМиМ,
Ю.А. Шахтаров, инженер-механик, В.А. Прищепов, инженер-механик;
Ухтинский государственный технический университет

Возможность создания условий избирательного переноса при трении деталей цилиндропоршневой группы двигателей транспортных машин достигается установкой на поршень латунных колец, заменяя одно из серийных чугунных уплотнительных колец. Приведены результаты эксплуатационных испытаний двигателя с латунными кольцами, в процессе которых измеряли давление сжатия в цилиндре и контролировали скорость изнашивания деталей по данным рентгено-спектрального флуоресцентного анализа проб моторного масла. Износ колец определяли взвешиванием в конце испытаний.

Срок службы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) до капитального ремонта определяется в основном скоростью изнашивания деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), увеличение долговечности которых является весьма актуальной задачей. Долговечность деталей ЦПГ зависит от различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Внешние эксплуатационные факторы влияют на долговечность и безотказность узлов и агрегатов машин, изменяя, прежде всего, условия и режимы работы трущихся поверхностей деталей в сопряжениях. Так, внешняя нагрузка на двигатель передается на детали ЦПГ через динамические параметры рабочего процесса сгорания топлива в цилиндре: максимальное давление P_z и скорость нарастания давления $dP/d\phi$ [1].

В общем виде износ деталей в сопряжении может быть выражен зависимостью

$$U = \alpha \cdot P^m \cdot V^n \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta \tau}\right)^k \cdot \left(\frac{\Delta V}{\Delta \tau}\right)^l \cdot \tau,$$

где α — величина удельной скорости изнашивания, учитывающая влияние внешних условий трения (режим смазки, температуру, коррозионную и абразивную агрессивность среды и т. п.); P — среднее давление на детали, например, давление поршневого кольца на стенку гильзы цилиндра за цикл, или вкладыша подшипника на шейку коленчатого вала; V — скорость относительного перемещения деталей; m, n, k, l — показатели влия-

ния давления, скорости и их изменения на износ деталей, зависящие также от условий трения (показатель m изменяется от $m = 1-2$ до $m = 2-3$); τ — продолжительность работы.

Условия смазки, нагрузка, скорость перемещения и температура непосредственно в зоне трения определяют процессы взаимодействия микронеровностей и интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей машин.

Наиболее благоприятными для долговечности сопрягаемых деталей является режим жидкостного трения, при котором слой смазки между деталями в 1,5–2,0 раза больше суммарной высоты микронеровностей трущихся поверхностей. Поскольку рабочие поверхности не соприкасаются, а сопротивление перемещению деталей вызывается лишь силами трения между слоями жидкости и ее вязкостью, скорость изнашивания деталей и потери мощности на трение в узлах на этих режимах наименьшие.

Однако в период начала вращения вала при пуске двигателя или резкого изменения нагрузочного или скоростного режима слой смазки в сопряжениях уменьшается ($h_{\min} < 4-6$ мкм) и становится недостаточным, чтобы предотвратить контактирование микронеровностей шероховатых поверхностей. На этих режимах детали работают в условиях граничного трения, и на скорость изнашивания деталей большое влияние оказывают прочность масляной пленки и физико-химические, противоизносные и противозадирные свойства смазочных материалов, которые улучшают введением специальных присадок. В процессе длительной эксплуатации присадки срабатываются, свойства масел ухудшаются и не могут предотвратить интенсивное изнашивание и разрушение трущихся поверхностей.

Для повышения долговечности и безотказности деталей широко применяется эффект избирательного переноса (ИП) при трении, с появлением которого на трущихся поверхностях в зоне контакта самопроизвольно образуется металлоплакирующая пленка — неокисляющаяся тонкая металлическая медная пленка с низким сопротивлением сдвигу [2]. Поверхности сопряженных деталей находятся под пленкой и в процессе трения не участвуют, воспринимая более равномерно распределенную и меньшую по величине нагрузку.

Узел трения в режиме ИП работает подобно узлу, смазываемому жидким металлом. Благодаря созданию металлоплакирующей пленки, разделяющей трущиеся поверхности даже при высоких нагрузках, износ деталей в условиях ИП может быть снижен до нуля (эффект безызносности), а коэффициент трения — до значений при жидком трении.

Условия ИП для снижения износа трущихся поверхностей обычно создают, применяя простые и недорогие, но высоко эффективные методы:

- введением медьсодержащих присадок в масла;
- нанесением на рабочие поверхности деталей слоя цветного металла (латуни, бронзы меди) финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО);
- установкой вставок из цветных металлов в детали машин (например, в поршневые кольца).

Несмотря на эффективность, эти методы имеют некоторые недостатки и ограничения в использовании. Так, масла с присадками не обеспечивают хорошую смазку поверхностей трения в верхней зоне гильз цилиндров из-за задержки поступления масла, особенно длительной при пуске двигателей зимой.

Толщина слоя наносимого металла при ФАБО (1–2 мкм), весьма эффективная в начальный период работы, оказывается недостаточной при длительной эксплуатации двигателя, когда радиальный износ гильз цилиндров достигает 100–150 мкм и более.

Установка вставок из цветных металлов возможна лишь в большие по высоте поршневые кольца (ПК) двигателей большой размерности, и этот метод практически не применим для ДВС автотракторной техники, у которых высота поршневого кольца в большинстве случаев не превышает 3 мм.

Для создания ИП целесообразно и вполне возможно устанавливать на поршень цельное поршневое кольцо из цветных металлов (меди, латуни, бронзы) дополнительно к стандартным или заменяя одно из серийных чугунных ПК [1]. Металлоплакирующая пленка на поверхности трения деталей ЦПГ (гильз цилиндров и чугунных поршневых колец) создается вследствие изнашивания цветного металла непрерывно в процессе работы двигателя. При этом продукты износа цветного металла растворяются в работавшем моторном масле, в котором увеличивается содержание меди и цинка, применяемых в качестве противоизносных и противозадирных присадок к маслам, что повышает долговечность других сопряжений и двигателя в целом.

Известно, на поршни ДВС устанавливается обычно по 3 компрессионных (уплотнительных) кольца. Распределение давления газов в поршне-

вых канавках на поршневые кольца показывает, что третье поршневое кольцо существенно не влияет на давление сжатия, так как оно воспринимает не более 8 % максимального давления сгорания P_z (рис. 1).

Поэтому в форсированных по частоте вращения двигателях количество уплотнительных колец на поршне уменьшено до двух для снижения потерь энергии на трение в ЦПГ. В связи с этим третье чугунное компрессионное кольцо можно заменить кольцом из цветных металлов (ЦМ), которое будет работать в качестве донора меди для создания металлоплакирующей пленки.

В двигателях с двумя компрессионными кольцами на поршне устанавливаемое кольцо из ЦМ должно быть не только донором меди, но и выполнять свою прямую уплотнительную функцию.

При этом необходимо выбрать цветной металл для изготовления поршневого кольца (латунь, медь, или бронза) и канавку на поршне для его установки.

С учетом распределения давления газов в поршневых канавках (см. рис. 1) наиболее обоснована установка ПК из ЦМ в первой канавке и перестановка первого хромированного кольца во вторую, так как в этом случае в процессе работы снижается давление газов, прижимающих хромированное кольцо к стенке цилиндра, и тем самым снижается его износ.

Проведенные исследования двигателей СМД-14БН показали, что наиболее приемлемый металл для этой цели — латунь (по сравнению с медью и бронзой). Установленные латунные ПК в первую, вторую или третью поршневые канавки снижают износ хромированных и чугунных уплотнительных колец в период обкатки на 20 % и на 30–36 % — на пусковых режимах. Относительный износ третьего чугунного поршневого кольца, расположенного непосредственно под латунным ПК во второй канавке, составил на этих режимах соответственно 0,78 и 0,49. Износ первого и второго маслоъемных колец

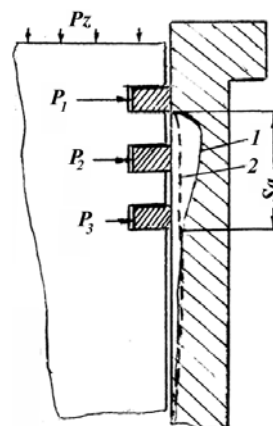


Рис. 1. Схема установки уплотнительных колец на поршне и эпюра максимального износа верхней зоны гильз цилиндров на режимах пуска в условиях эксплуатации (1) и при позднем впрыске топлива (2):

P_1, P_2, P_3 — давление газов в радиальном зазоре кольцо–канавка, прижимающее I, II и III поршневое кольцо к стенке гильзы, равное соответственно 0,76, 0,20 и 0,08 максимального давления сгорания топлива в цилиндре P_z

уменьшился до 0,72–0,59 соответствующих контрольных маслосъемных колец. Однако износ латунных ПК в первой канавке на кратковременных пусковых режимах оказывается заметно больше, чем износ хромированных колец [1]. Поэтому возникает необходимость оценки долговечности латунных колец в условиях длительной эксплуатации.

Эффективность предлагаемого метода создания условий ИП проверяли в процессе эксплуатационных испытаний двигателя УМЗ-4178 (4Ч-9,2/9,2, $N_e = 63$ кВт, $n = 4500$ об/мин), у которого на поршне по 2 чугунных уплотнительных кольца.

В двигатель были установлены 4 латунных (латунь Л68) поршневых кольца: в первом и третьем цилиндрах — в первой поршневой канавке, во втором и четвертом — во второй. Принятая схема расположения колец позволяет оценить зависимость скорости изнашивания уплотнительных серийных и латунных ПК от давления продуктов сгорания топлива в цилиндре и обосновать наиболее эффективное расположение латунных ПК на поршне.

Износ латунных и стандартных колец определяли взвешиванием на аналитических весах, износ гильз — микрометрированием. Скорость изнашивания деталей ЦПГ в процессе испытаний контролировали по изменению концентрации основных элементов (железо, хром, медь, цинк, свинец) в моторном масле, периодически отбираемые пробы которого исследовали методом рентгено-спектрального флуоресцентного анализа (РСФА). Методика обработки спектров приведена в работе [3].

До начала обкатки, после холодной и горячей обкатки двигателя (на холостом ходу), а также периодически в течение эксплуатации автомобиля измеряли компрессию (давление сжатия P_c) (табл. 1).

Из приведенных данных видно, что латунные кольца, являясь донорами меди, обеспечивают номинальное давление сжатия.

Содержание основных элементов в пробах свежего моторного масла (SAE 10W-40, API SG/CD), а также после обкатки двигателя и после пробега автомобиля, полученное рентгеноспектральным флуоресцентным методом (РСФА), приведено в табл. 2.

Результаты анализа проб масла показали, что установка латунных колец на поршень двигателя заметно повышает как относительное, так и абсолютное содержание меди и цинка в пробах масла, и подтверждает высокую эффективность предлагаемого метода создания условий ИП и повышения долговечности двигателей.

После снятия латунных ПК и установки серийных чугунных колец в моторном масле весьма

Таблица 1

Результаты измерения давления сжатия в цилиндрах двигателя

Компрессия, МПа,	Цилиндры			
	1	2	3	4
После сборки	0,8	0,6	0,75	0,8
После холодной обкатки	1,0	0,95	1,0	0,8
После 1-го этапа горячей обкатки	0,75	0,75	0,75	0,8
После 2-го этапа горячей обкатки	0,78	0,78	0,75	0,79
После 435 км пробега	0,8	0,8	0,8	0,8
После 1519 км и 7773 пробега	0,8	0,8	0,8	0,8
Латунные ПК сняты и установлен новый комплект стандартных колец				
После сборки	0,8	0,75	0,75	0,8
После 1237 км пробега	0,8	0,7	0,8	0,8

заметно снизилось содержание меди и цинка. Уменьшение концентрации железа, оцениваемое по абсолютной интенсивности излучения спектра, объясняется приработкой и латунированием (созданием металлоплакирующей пленки) на рабочей поверхности (на зеркале) гильз цилиндров в процессе предыдущих испытаний двигателя с латунными кольцами.

Весовой износ ПК измеряли после 7773 км пробега автомобиля (табл. 3). Износ гильз цилиндров не обнаружен.

В качестве сравнительных данных, сопоставимых с результатами испытаний двигателей другой размерности, приведена удельная интенсивность изнашивания поршневых колец — весовой износ на 1000 км пробега и на единицу массы поршневых колец, мг/(г · 1000 км), также мг/1000 км (табл. 4).

Анализ результатов взвешивания показывает, что давление газов в поршневой канавке, прижимающее поршневые кольца к стенке гильзы цилиндра, существенно влияет на весовой износ поршневых колец. Так, интенсивность износа хромированных поршневых колец в первой канавке в 3 раза больше (24,89 мг/1000 км), чем во второй (8,5 мг/1000 км). Влияние давления продуктов сгорания в поршневой канавке P на износ хромированного поршневого кольца выражается зависимостью

$$I_{Cr} = 0,031 \cdot P^{0,8048},$$

где P — давление газов в поршневой канавке в % максимального давления сгорания P_c (см. рис. 1).

Более сильное влияние давление P (и другие условия работы в цилиндре) оказывает на износ латунных поршневых колец, которое выражается

Таблица 2

Относительная (% , числитель) и абсолютная (имп/с, знаменатель) интенсивность спектров элементов в пробах моторного масла

Проба (пробег, км)	Fe	Cr	Cu	Mn	Zn	Pb	Суммарная интенсивность
Масло свежее	$\frac{1,867}{613}$	$\frac{0,116}{38}$	$\frac{27,543}{9043}$	$\frac{0,210}{69}$	$\frac{70,264}{23069}$	—	32832
«0» проба (1 час работы двигателя)	$\frac{3,211}{1135}$	$\frac{0,167}{59}$	$\frac{30,847}{10904}$	$\frac{0,124}{44}$	$\frac{65,651}{23207}$	—	35349
1-я проба (1519)	$\frac{3,321}{1325}$	$\frac{0,193}{77}$	$\frac{38,696}{15440}$	$\frac{0,190}{76}$	$\frac{57,600}{22983}$	—	39901
2-я проба (2559)	$\frac{2,891}{1477}$	$\frac{0,131}{67}$	$\frac{42,350}{21635}$	$\frac{0,119}{61}$	$\frac{53,103}{27128}$	$\frac{1,405}{718}$	51086
3-я проба (4233)	$\frac{3,003}{1678}$	$\frac{0,147}{82}$	$\frac{43,680}{24404}$	$\frac{0,072}{40}$	$\frac{51,031}{28511}$	$\frac{2,067}{1155}$	55870
4-я проба (7110)	$\frac{3,117}{1632}$	$\frac{0,153}{80}$	$\frac{44,382}{23238}$	$\frac{0,159}{83}$	$\frac{51,076}{26743}$	$\frac{1,113}{583}$	52352
5-я проба (7773)	$\frac{3,235}{1752}$	$\frac{0,155}{84}$	$\frac{44,976}{24361}$	$\frac{0,105}{57}$	$\frac{50,604}{27409}$	$\frac{0,925}{501}$	54164
Латунные ПК сняты, поставлены серийные ПК							
«0» контр. проба	$\frac{3,662}{793}$	$\frac{0,249}{54}$	$\frac{45,080}{9762}$	$\frac{0,360}{78}$	$\frac{49,721}{10767}$	$\frac{0,928}{201}$	21655
1-я проба (к) (1237)	$\frac{4,535}{990}$	$\frac{0,174}{38}$	$\frac{45,223}{9873}$	$\frac{0,179}{39}$	$\frac{48,768}{10647}$	$\frac{1,241}{271}$	21832
2-я проба (к) (2119)	$\frac{4,602}{986}$	$\frac{0,257}{55}$	$\frac{44,348}{9502}$	$\frac{0,257}{55}$	$\frac{49,631}{10634}$	$\frac{0,905}{194}$	21426

Таблица 3

Средний весовой, г, и относительный (%) износ поршневых колец

Кольцо	Цилиндры	
	I, III	II, IV
Латунное	4,8101 (26,58) (первая канавка)	0,9082 (4,99) (вторая канавка)
Стандартное, хромированное	0,0661 (0,46) (вторая канавка)	0,1935 (1,35) (первая канавка)
Маслосъемное	0,0485 (0,27)	0,0332 (0,18)

Таблица 4

Среднее значение удельного весового износа поршневых колец, мг/(г · 1000 км), (мг/1000 км пробега)

Кольцо	Цилиндры	
	I, III	II, IV
Латунное	34,5 (618,82) (первая канавка)	6,52 (116,84) (вторая канавка)
Стандартное (хромированное)	0,60 (8,5) (вторая канавка)	1,76 (24,89) (первая канавка)
Маслосъемное	0,35 (6,24)	0,24 (4,27)

зависимостью: $I_{лат} = 0,8717 \cdot P^{1,2487}$. Износ латунных поршневых колец в первой поршневой канавке в 5,5 раз больше, чем во второй (618,8 и 116,8 мг/1000 км).

Долговечность двигателя в этом случае ограничивается сроком службы латунных поршневых колец, установленных в первой канавке.

Средний весовой износ латунных поршневых колец за время испытаний недопустимо высокий: 4,8101 и 0,9082 г в первой и во второй поршневой канавке соответственно, что в 24,8 и 13,7 раз превышает износ серийных хромированных колец. Латунные кольца, установленные во второй поршневой канавке, изнашиваются в 4,7 раза интенсивнее хромированных поршневых колец в первой канавке.

При этом следует отметить необычно интенсивное изнашивание латунных поршневых колец по высоте, вследствие чего их поперечное сечение из прямоугольного приобретает форму тавра. Интенсивное изнашивание верхней и нижней поверхности кольца объясняется неблагоприятными условиями смазки и высокой температурой латунных колец в первой канавке, а также высокими инерционными ударными нагрузками в ВМТ и НМТ, которые возрастают с увеличением скоростных режимов работы двигателей. (В условиях эксплуатации двигателей также наблюдается интенсивное изнашивание по высоте чугунных поршневых колец.)

Результаты испытаний показали снижение износа (в 1,46 раза) маслосъемных колец, расположенных непосредственно под латунными кольцами во втором и четвертом цилиндрах.

Учитывая величину давления продуктов сгорания в поршневых канавках на поршневые кольца (см. рис. 1), интенсивность изнашивания латунных колец может быть снижена установкой их в третью поршневую канавку, что подтвер-

ждается результатами испытаний двигателей СМД-14БН [1]. Для повышения долговечности латунных колец, устанавливаемых во вторую поршневую канавку, следует применять материал (латунь), обладающий более высокими механическими свойствами и большей износостойкостью.

Выводы.

1. Результаты РСФА моторного масла показывают, что установка латунных поршневых колец является весьма эффективным методом создания условий ИП при трении деталей ЦПГ в целях повышения долговечности двигателей.

2. Долговечность латунных поршневых колец, сопоставимая с долговечностью первого хромированного поршневого кольца, достигается установкой латунных ПК в третью поршневую канавку. Латунные ПК, устанавливаемые во вторую поршневую канавку, следует изготавливать

из марок латуни, обладающих более высокими механическими и противоизносными свойствами.

3. Латунные поршневые кольца в первой канавке можно применять в качестве модели для проведения ускоренных испытаний двигателей при исследовании влияния условий и режимов работы в цилиндре на скорость изнашивания деталей ЦПГ.

Литература

1. Суранов Г.И. Снижение износа деталей машин. — Ухта: УИИ, 1999 — 224 с.

2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.

3. Латышев А.А., Суранов Г.И. Влияние электролитического наводороживания на содержание легирующих элементов в стали // МиТОМ. — 2003. — № 3. — С. 32–36.

**2 марта 2007 года на 93-м году жизни скончался
старейший сотрудник
Центрального научно-исследовательского
дизельного института,
создатель научной школы автоматизации двигателей,
доктор технических наук, профессор
МАРК ИОСИФОВИЧ ЛЕВИН**

В 1939 году, вскоре после своего поступления в ЦНИДИ, М.И. Левин, выпускник Ленинградского Политехнического института, был призван в армию. Он прошел всю войну в танковых войсках и был удостоен многих боевых наград. В 1946 году М.И. Левин вернулся в институт, где проработал 64 года и активно сотрудничал с журналом «Двигателестроение».

В институте он возглавил работы по автоматизации дизелей и дизельных установок различного назначения. Созданный им отдел автоматизации в течение многих лет успешно решал задачи отечественного двигателестроения в области автоматики, терморегулирования, безразборной диагностики, регуляторов скорости и систем дистанционного управления, комплексной автоматизации.

Марку Иосифовичу принадлежит решающая роль в создании специализированных производств изделий автоматики в Саратове, Тарту, Риге, Киеве, Старой Руссе, Каменец-Подольске, Усть-Каменогорске и Сафоново. Он автор многих научных работ, изобретений, а также монографии, ставшей на многие годы настольной книгой инженеров и исследователей, работавших в данной области, принимал участие в составлении и редактировании ряда специализированных справочных изданий, на протяжении многих лет работал в редколлегии журнала «Двигателестроение».

Марк Иосифович всегда придавал первостепенное значение подготовке инженерных и научных кадров. Под его руководством более 40 сотрудников института и работников промышленности успешно завершили обучение в аспирантуре и защитили диссертации.

М.И. Левин пользовался огромным авторитетом и уважением среди своих коллег, во многом определяя техническую политику отечественных дизельных заводов, а его известность как крупного ученого и организатора выходила далеко за пределы отрасли. Редкое трудолюбие, целеустремленность, методичность, высокая требовательность к себе и к своим сотрудникам, исключительная доброжелательность и интеллигентность — вот качества, позволившие ему завоевать любовь и уважение не только коллег, но и большинства знавших его людей.

Светлая память о Марке Иосифовиче Левине навсегда сохранится в сердцах его коллег и учеников.

Редакция журнала «Двигателестроение»

