

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАСЛОСЪЕМНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ С ПОКРЫТИЕМ ОЛОВА ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

Т. С. СКОБЛО¹, А. И. СИДАШЕНКО¹, Е. А. САТАНОВСКИЙ²,
А. К. ОЛЕЙНИК², Т. В. МАЛЬЦЕВ¹

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. Петра Василенко;*

Государственное предприятие “Завод им. В. А. Малышева”, Харьков

Оценен износ серийных маслосъемных поршневых колец тепловозного дизель-генератора Д100 на возвратно-поступательной машине трения, моделирующей условия эксплуатации. Определена степень их изнашивания по весу и увеличению рабочего пояска кольца при различных скоростях скольжения. Проанализировано изменение их микротвердости до и после испытаний. Локальным микрорентгеноспектральным анализом установлен характер изменения структуры поверхности трения при различных параметрах испытаний. Выявлено, что приработочное покрытие оловом отсутствует на рабочих кромках колец, где формируются характерные полосы трения с проявлением сетки графита основы. Установлена особенность структуризации наклонной поверхности в области ее примыкания к рабочему пояску. Для повышения стойкости таких колец при эксплуатации рекомендовано наносить ионно-плазменные нанопокртия с дополнительным контролем качества и обеспечить снятие остаточных напряжений.

Ключевые слова: *маслосъемные поршневые кольца, трение, износ, микротвердость, химический состав, принцип Сен-Венана.*

Опыт эксплуатации отечественных тепловозных дизельных генераторов Д100 свидетельствует о существенном повышении выхлопов дыма, увеличении нагароотложений в выпускном тракте двигателя и перерасхода масла вследствие интенсивного износа маслосъемных поршневых колец после пробега менее гарантированного ресурса (до $1 \cdot 10^6$ km). Кольца изготавливают из серого чугуна без какой-либо упрочняющей технологии для повышения износостойкости их рабочих поверхностей. Износ компрессионных колец значительно меньше, нежели маслосъемных. Немаловажную роль в обеспечении их долговечности играет выбор материала для изготовления (высокопрочный чугун) и последующее гальваническое хромирование.

Цель настоящей работы – определить характер и уровень износа маслосъемных поршневых колец двигателя Д100, изготавливаемых по серийной технологии, для последующего выбора наиболее эффективной технологии упрочнения их рабочих кромок и обеспечения более высокой износостойкости.

Материалы и методика испытаний. Высота рабочего пояска (кромки) поперечного сечения маслосъемного кольца двигателя Д100 всего 0,2 mm с верхним предельным отклонением +0,3 mm (рис. 1). Кромка снимает масло со стенок цилиндра в картер двигателя, предотвращая его попадание в камеру сгорания.

Диаметр кольца 207 mm, размер замка в свободном состоянии 26...32 mm. После изготовления эти изделия подвергают гальваническому лужению, чтобы сократить период их приработки, формируя слой олова на рабочем пояске и прилегающей к нему наклонной поверхности кольца. Зерна оловянного покрытия неоднородные и состоят из отдельных фрагментов и выглаженных участков (рис. 2а, спектр 1).

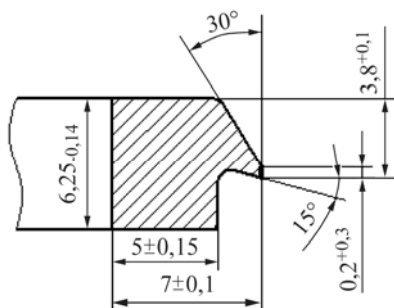


Рис. 1. Поперечное сечение маслосъемного поршневого кольца тепловозного двигателя Д100.

Fig. 1. Sketch of the cross section of the oil scraper piston ring of D100 locomotive engine.

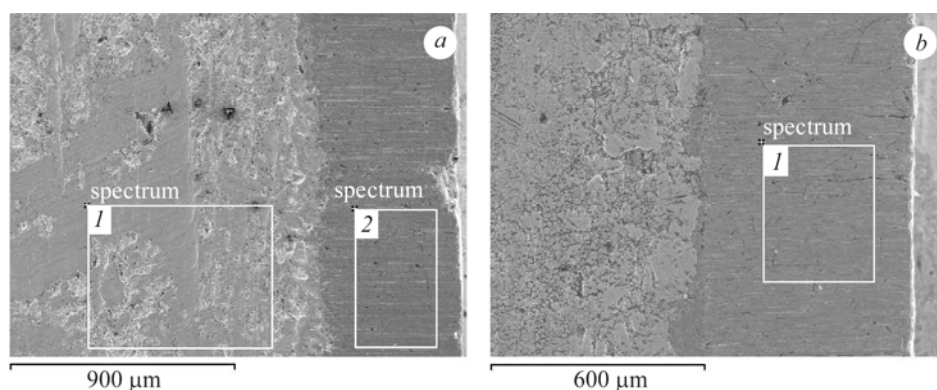


Рис. 2. Зоны определения химического состава поверхности трения (*a* – спектр 2; *b* – спектр 1) и исходной (*a* – спектр 1) образцов серийного кольца, испытанных при скорости трения 1 (*a*) и 1,3 m/s (*b*).

Fig. 2. Zones of determining the chemical composition of the friction surface (*a* – spectrum 2; *b* – spectrum 1) and the original (*a* – spectrum 1) of the samples of a batch ring tested at the sliding speed of 1 (*a*) and 1.3 m/s (*b*).

Для оценки степени и характера изнашивания таких колец на ГП “Завод им. В. А. Малышева” выполнены стендовые испытания на трение и износ на специализированной возвратно-поступательной машине, предназначенной для определения эффективных параметров упрочнения и влияния трения на износ образцов пары гильза–поршневое кольцо. Исследовали в условиях трения скольжения. Машина имеет четыре камеры, в каждую из которых устанавливали по одному образцу гильзы цилиндров (подвижная деталь) и по два образца от поршневого кольца. Образцы гильзы цилиндров изготавливали из серого чугуна марки СЧ ХНМР и подвергали фосфатированию (серийная технология) (рис. 3).

Их постоянная скорость перемещения для двух камер 1,3 m/s; для остальных двух – 1 m/s. Нагрузка для всех образцов была неизменной и составляла 3,35 kg, что соответствовало удельному давлению на рабочую кромку одного образца кольца 0,8 МПа. Следует отметить, что во время эксплуатации двигателя скорость перемещения поршня, при частоте оборотов коленчатого вала 810 rpm (номинальная мощность), составляет 7,2 m/s, а удельное давление рабочей кромки на стенку цилиндра ~ 0,2 МПа, что в 4 раза меньше, чем в принятом эксперименте. Так удалось смоделировать изнашивание за более короткий период испыта-

ний. Длина рабочего хода образца гильзы цилиндров 100 mm (рис. 3). Подавали масло игольчатым клапаном по 1–2 капли в минуту. В качестве смазки использовали моторное масло марки М14-В₂. Общее время испытаний 100 h: первый этап (приработка) 3 h; второй и третий этапы основных испытаний 25 и 72 h. Общая длина пройденного пути трения образцов со скоростью скольжения 1 m/s составила 360000 m, а для образцов со скоростью 1,3 m/s равнялась 468000 m.

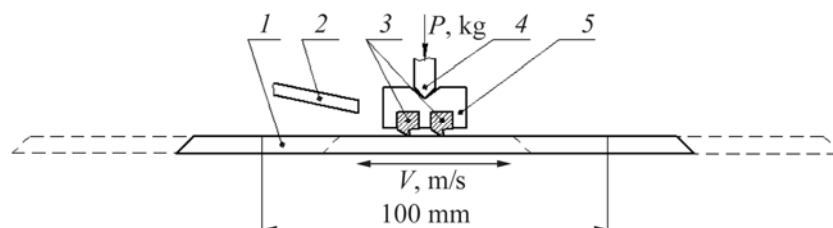


Рис. 3. Схема испытаний образцов маслоъемных поршневых колец: 1 – образец гильзы цилиндров; 2 – патрубок капельной подачи масла; 3 – образцы маслоъемных поршневых колец; 4 – груз; 5 – держатель.

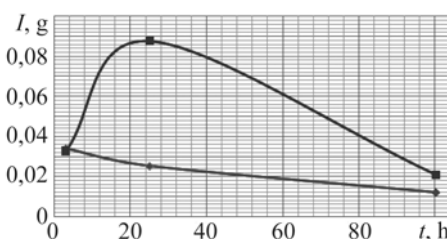
Fig. 3. Test chart of the oil scraper piston rings samples:

1 – sample of the cylinder sleeve; 2 – drip feed oil pipe; 3 – samples of oil scraper piston rings; 4 – load; 5 – holder of rings samples.

Результаты испытаний. Рис. 4 иллюстрирует степень износа образцов гильз цилиндров (I , g) при скорости скольжения 1 и 1,3 m/s, в качестве контртел которых использовали серийные маслоъемные кольца.

Рис. 4. Степень износа образцов гильз цилиндров при трении об поршневое кольцо, изготовленное по серийной технологии: ◆ – скорость скольжения 1 m/s; ■ – 1,3 m/s.

Fig. 4. Wear degree of the cylinder sleeve sample under friction with a piston ring made by serials technology: ◆ – sliding speed 1 m/s; ■ – 1.3 m/s.

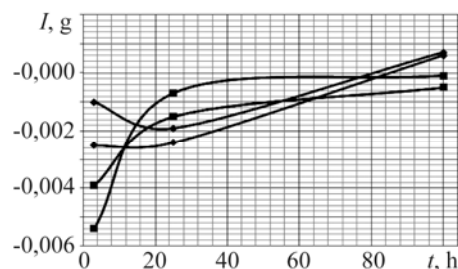


Следует отметить, что за все этапы испытаний суммарная интенсивность изнашивания образцов гильз цилиндров в паре с образцами серийных маслоъемных поршневых колец в 1,6 раза выше при скорости скольжения 1,3 m/s, что свидетельствует о существенном ее влиянии на износ.

Установили (рис. 5), что интенсивность изнашивания образцов, испытанных при скорости скольжения 1,3 m/s, на 16% больше, чем при 1 m/s (с учетом пройденных путей трения), что согласуется с аналогичными результатами испытания контртел при соответствующих скоростях трения.

Рис. 5. Степень износа образцов маслоъемных поршневых колец при скорости скольжения: ◆ – 1 m/s (образцы № 3 и 4); ■ – 1,3 m/s (образцы № 1 и 2).

Fig. 5. Wear degree of the oil scraper piston rings samples at sliding speed: ◆ – 1 m/s (samples № 3 and 4); ■ – 1.3 m/s (samples № 1 and 2).



Высота рабочих кромок образцов серийных колец, испытанных при скорости скольжения 1 м/с, в среднем увеличилась на 0,06 мм, а при скорости 1,3 м/с – на 0,04 мм (табл. 1). Возможно, в последнем случае это связано с преобладанием упругой деформации рабочих поясков образцов.

Таблица 1. Увеличение высоты рабочих кромок образцов кольца после испытаний

№ образца	Увеличение высоты на, мм	Скорость скольжения, м/с
1	0,04	1,3
2	0,04	
3	0,05	1
4	0,07	

Микротвердость поверхностей трения образцов поршневых колец после второго и третьего этапов испытания повышается в среднем в 11,6 и 10,9 раза соответственно (табл. 2) по сравнению с исходной (до испытаний). Это обусловлено наличием покрытия олова, которое обеспечивает низкие показатели только в период приработки, а уже после второго этапа зафиксирована разница в степени упрочнения при различных скоростях трения.

Таблица 2. Микротвердость образцов серийных маслоъемных поршневых колец, МПа

№ образца	Исходная	После второго этапа испытаний	После третьего этапа испытаний
1	323	4165	4577
2	304	4224	3930
3	598	4763	4194
4	314	4704	3998

Результаты локального микрорентгеноспектрального анализа исходной поверхности образцов колец и химический состав поверхностей их трения представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Химический состав исходной (спектр 1) и поверхности трения (спектр 2) образца поршневого кольца, испытанного при скорости скольжения 1 м/с

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Sn
Спектр 1	1,09	–	0,29	0,29	–	–	–	–	1,14	97,21
Спектр 2	2,23	–	0,23	1,65	0,52	–	0,42	1,66	93,28	–

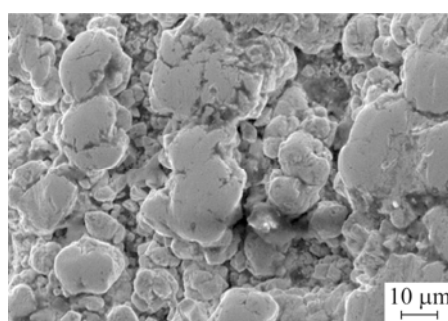
Таблица 4. Химический состав поверхности рабочей кромки образца поршневого кольца, испытанного при скорости скольжения 1,3 м/с

Зона	C	O	Al	Si	P	Ca	Cr	Mn	Fe
Спектр 1	2,69	–	–	1,86	–	–	–	1,25	94,2

В целом характер поверхностей трения после испытаний и химический состав исходного образца серого чугуна по содержанию C, Si, Mn и Fe сопоставим при скоростях скольжения 1 и 1,3 m/s. Однако следует отметить, что при обеих скоростях олова ни на одной из поверхностей рабочих кромок не выявили. Одновременно обнаружили напряжения, которые нарушают целостность покрытия олова на поверхности, не участвующей в трении, способствуя его структуризации в зоне наклонной плоскости (см. рис. 2 и 6). Возможно, здесь имеет место принцип Сен-Венана [1, 2], когда изменяется напряженно-деформированное состояние близлежащей области материала (зона прилегания наклонной поверхности к пояску кольца) вследствие приложения внешней нагрузки на область (рабочий поясок кольца), несколько удаленную от зоны возникновения деформации. А изменение макрорельефа зоны примыкания наклонной плоскости к рабочей кромке на величину, близкую к высоте пояска (~ 0,45...0,5 mm), является следствием такого эффекта.

Рис. 6. Структуризация зерен олова в зоне воздействия напряжений согласно принципу Сен-Венана.

Fig. 6. Structuring of tin grains in the zone of stress influence according to the Sen-Venan's principle.



При этом зафиксировали частичный перенос фосфора (табл. 3) на кромку кольца от его контртела. Это объясняет привес данного образца после испытаний (см. рис. 5). Также обнаружили характерные продольные полосы на поверхности рабочего пояска вследствие трения по направлению перемещения образцов. Выявили и формирование графитной сетки в виде отдельных хаотично расположенных и ориентированных продолговатых включений черного цвета, особенно на рабочей кромке образца, испытанного при скорости 1,3 m/s (см. рис. 2), что соответствует исходному металлу.

Следовательно, чтобы увеличить срок службы таких изделий, особенно при высоких скоростях скольжения пар трения, необходимо повысить стойкость к механическому изнашиванию. Для решения этой задачи, чтобы не применять материал с более высокими физико-механическими характеристиками (например, высокопрочный чугун), целесообразны высокоэффективные ионно-плазменные технологии (в т.ч. нанотехнологии) обработки поверхности трения маслоъемного кольца, которые могут обеспечить многократное повышение износостойкости, жаропрочности, стойкости к коррозии, трещиностойкости [3–9] различных изделий, в т.ч. и таких колец.

Кроме того, необходимо изменить напряженно-деформированное состояние для успешной эксплуатации такого кольца, поскольку в процессе нанесения нанопокровов размер замка изменяется от 3 до 17% в зависимости от материала кольца, а также возникают значительные напряжения в различных его зонах. Для этого предложена технология контроля качества и обеспечения эффективного использования упрочненных колец [10].

ВЫВОДЫ

По результатам испытаний на трение и износ сопряжений поршневое кольцо–гильза цилиндра, изготовленных по принятой на предприятии технологии, можно определить характер изнашивания в зависимости от параметров трения, в частности, скорости скольжения. Выявлено, что маслосъемные кольца изнашиваются как по весу, так и по высоте рабочей кромки. Микрорентгеноспектральным анализом не обнаружено олова, нанесенного на рабочие поверхности поршневого кольца, и увеличение доли основы серого чугуна, что также подтверждают измерения микротвердости этих зон. Присутствие на поверхности трения образцов колец фосфора (при скорости 1 м/с) свидетельствует о его частичном переносе с поверхности контртела (фосфотированный образец гильзы) вследствие трения. Представляет интерес факт структуризации наклонной поверхности, прилегающей к рабочей кромке, на величину, близкую к высоте пояска (~ 0,45...0,5 мм). Результаты исследований могут служить основанием для повышения эксплуатационной стойкости маслосъемных поршневых колец путем их упрочнения специальными ионно-плазменными пленками, в том числе и нанопокрывтиями. При этом следует учесть соотношение твердости и свойств сопрягаемой детали для минимизации условий, вызывающих налипание компонентов сопрягаемой детали, а также напряжения и условия сохранения размера замка в поршневых кольцах.

РЕЗЮМЕ. Оцінено зношування серійних оливознімних поршневих кілець тепловозного дизель-генератора Д100 на зворотно-поступальній машині тертя, що моделює умови експлуатації. Визначено ступінь їх зносу як за вагою, так і збільшенням робочої поверхні кільця за різних швидкостей ковзання. Оцінено зміну їх микротвердості до і після випробувань. Локальним микрорентгеноспектральним аналізом встановлено характер зміни структури поверхні тертя за різних параметрів випроб. Виявлено, що припрацювальний покрив оловом відсутній на робочих кромках кілець, де формуються характерні смуги тертя з проявом сітки графіту основи. Проаналізовано особливості структуризації похилої поверхні в місці її примикання до робочої кромки. Для підвищення тривкості таких кілець під час експлуатації рекомендовано наносити іонно-плазмові нанопокриви з додатковим контролем якості та забезпечити зняття залишкових напружень.

SUMMARY. Wear evaluation of batch oil scrapper piston rings of locomotive diesel engine D100 by using machine of friction with reciprocating motion, simulating the operating conditions is evaluated. Degree of their wear by measuring the weight loss and friction surface length increase of the rings under different friction velocity is determined. Their microhardness changes before and after the wear test is evaluated. Character of the structure change under different test parameters of the friction surface is done by local X-ray spectral microanalysis. Absence the tin coating on the working surfaces of the rings, on which typical friction strips are formed with the appearance of the typical graphite grid of the base is shown. Peculiarities of the inlined surface structuring in the area of its joining the friction surface of the rings is shown. Applying ion-plasma nanocoatings with the additional steps of quality control and providing residual stresses relaxation, to improve the resistance in use of such rings, is recommended.

1. *Принцип Сен-Венана и гипотеза плоских сечений.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://scask.ru/book_rbt.php?id=18.
2. *Эффекты второго порядка и принцип Сен-Венана в задаче кручения нелинейно-упругого стержня.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/e3c/e3c2e51ba6e64e0b53ef244424f84df6.pdf>.

3. Упрочнение деталей двигателей внутреннего сгорания методами ионно-плазменных и лазерных технологий / Л. П. Клименко, П. Я. Ревнюк, О. Ф. Прищепов, В. И. Андреев, С. Н. Соловьев // Двигатели внутреннего сгорания. Технология производства ДВС. – 2014. – № 2. – С. 82–84.
4. Определение триботехнических характеристик композитных ионно-плазменных покрытий для поршневых колец дизельных двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nano.org.ua/Library/Moshchenok.pdf>.
5. Механические свойства наноструктурированных покрытий (Ti, Al)N и (Ti, Cr)N, полученных методом вакуумно-дугового осаждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pse.scp.org.ua/rus/jornal/2_14/22.pdf
6. *Thamotharan J. and Sarala R.* Characterization of CrN/TiN PVD coatings on 316L stainless steel // *Int. J. of Chem. Tech. Research.* – 2014. – 6, № 6. – P. 3284–3286.
7. *Dobrzański L. A. and Żukowska L. W.* Structure and properties of gradient PVD coatings deposited on the sintered tool materials // *J. of Achievements in Mat. and Manufacturing Engng.* – 2011. – 44, № 2. – P. 115–139.
8. *SangYong Lee and SangYul Lee.* Comparative evaluation of TiN/CrN, AlN/CrN, TiAlN/CrN multilayer films for the use of semi-solid processing of Cu alloys // *Solid State Phenomena.* – 2006. – 116–117. – P. 124–127.
9. *Tribological properties and corrosion resistance enhancement of H13 hot work steel by means of CrN/TiN multilayers / G. G. Bejarano, B. M. Gomez, A. J. Osorio, Á. J. Caicedo, C. W. Aperador // J. of Mat. Sci. and Engng.* – 2010. – 4, № 6. – P. 51–59.
10. Патент № 110145, Україна, МПК (2016.01) G01N 27/00. Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями / Т. С. Скобло. – Опубл. 26.09.2016; Бюл. № 18.

Получено 11.10.2016