

PACS numbers: 07.05.Pj, 62.20.Qp, 81.05.Bx, 81.15.Jj, 81.40.Pq, 81.65.Lp, 81.70.Fy

Оптико-математический анализ моделирования структуризации упрочнённых поверхностей поршневых колец при эксплуатации

Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, И. Е. Гаркуша*, В. С. Таран*,
Р. М. Муратов*, Т. В. Мальцев

*Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства имени Петра Василенко,
ул. Алчевских, 44
61002 Харьков, Украина*

**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический
институт» НАН Украины,
ул. Академическая, 1,
61108 Харьков, Украина*

Изучено влияние технологии упрочнения поршневых колец многослойным ионно-плазменным покрытием TiN/CrN. Выявлены особенности их изнашивания при скорости скольжения 1,3 м/с, которая способствует максимальным изменениям. Показано, что при таких условиях испытаний в результате упрочнения в 15 раз повышается износостойкость. Методом оптико-математического анализа выявлены особенности структуризации поверхности трения, которые представляют собой формируемые поперечные и продольные полосы. Широкие поперечные полосы (~ 20 мкм), характерны для зоны трения кольца с покрытием TiN/CrN и они определяют высокую степень сопротивления изнашиванию.

Ключевые слова: поршневые кольца, ионно-плазменное покрытие, опти-

Corresponding author: Taras Vital'evich Mal'tsev
E-mail: taras.maltsev@gmail.com

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture,
44 Alchevskykh Str., 61002 Kharkiv, Ukraine
*National Science Center 'Kharkiv Institute of Physics and Technology', N.A.S. of
Ukraine, 1 Akademichna Str., UA-61108 Kharkiv, Ukraine*

Citation: T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, I. E. Garkusha, V. S. Taran, R. M. Muratov, and T. V. Mal'tsev, Optical-Mathematical Analysis of Structuration Modeling of Hardened Surfaces of Piston Rings during Operation, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 3: 349–362 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.03.0349](https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0349).

ко-математический анализ, структуризация, испытания на трение.

Вивчено вплив технології зміцнення поршневих кілець багат шаровим іонно-плазмовим покриттям TiN/CrN. Виявлено особливості їх зношування при швидкості ковзання 1,3 м/с, яка сприяє максимальним змінам. Показано, що при таких умовах випробувань, в результаті зміцнення, в 15 разів підвищується зносостійкість. Методом оптико-математичного аналізу виявлено особливості структуризації поверхні тертя, які представляють собою сформовані поперечні та поздовжні смуги. Широкі поперечні смуги (~ 20 мкм), характерні для зони тертя кільця з покриттям TiN/CrN і вони визначають високий ступінь опору зношування.

Ключові слова: поршневі кільця, іонно-плазмове покриття, оптико-математичний аналіз, структуризація, випробування на тертя.

The influence of the technology of piston rings' strengthening by multilayer ion-plasma TiN/CrN coating is studied. The peculiarities of their wear at the sliding speed of 1.3 m/s, which contributes to the maximum changes, are revealed. As shown, under these test conditions, as a result of hardening, wear resistance is increased by 15 times. The method of optical-mathematical analysis reveals the features of the friction surface structuring, which have the form of transverse and longitudinal bands. Wide transverse bands (~ 20 μm) are typical for the friction zone between rings and TiN/CrN coating and they determine a high degree of wear resistance.

Key words: piston rings, ion-plasma coating, optical-mathematical analysis, structuring, friction tests.

(Получено 27 декабря 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты ранее проведенных авторами исследований по оценке степени и характера изнашивания серийных маслоъемных поршневых колец дизель-генератора Д100 показали недостаточную их износостойкость [1]. Вследствие интенсивного износа таких колец в процессе эксплуатации, наблюдается повышение дымности выхлопа, нагароотложения в выпускном тракте двигателя, а также увеличенный расход масла. Следует отметить, что такие кольца по принятой технологии изготавливают из серого чугуна без использования упрочняющих технологий для повышения их стойкости к изнашиванию. Для решения задачи повышения их стойкости большой интерес представляют ионно-плазменные технологии нанесения твердых и сверхтвердых многослойных пленок и нанопокровов [2–7]. Для оценки напряженно-деформированного состояния различных зон серийных колец и колец, упрочненных ионно-плазменным покрытием, необходимо выявить особенности структурных изменений поверхности при трении с использованием оп-

тико-математического метода описания изменений на рабочей поверхности. Такой метод позволяет выявить зависимости между параметрами эксплуатации и формируемой структурой в контактирующих поверхностях колец, которые могут быть оценены по аппроксимации цифровых изображений изделий. Данный способ позволяет также оценить степень и характер формируемых напряжений и локально выявить зону их концентрации [8–16] по изменению структурной анизотропии.

Целью исследований является оценка формируемых структур с использованием оптико-математического метода после испытаний на трение и износ маслосъемных поршневых колец с ионно-плазменным многослойным покрытием.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения высокой износостойкости кольца выполнено нанесение многослойного ионно-плазменного покрытия системы TiN/CrN на установке типа «Булат». Осаждение покрытия осуществляли при токе дуги $I_d = 100$ А и напряжении смещения подложки $U_{см} = -200$ В. Поочередно наносили 6 слоев CrN и 5 — TiN, предварительно распылив подслои чистого Cr толщиной ~ 50 нм. При этом, толщина первого слоя TiN составила 49 нм, а CrN — 240 нм. Соотношение CrN/TiN составило 5,8. Общая толщина многослойного покрытия достигала 1,7 мкм.

По серийной технологии изготовления данные изделия подвергают гальваническому лужению для сокращения периода их обработки за счет формирования слоя олова на рабочей поверхности кольца. Серийные кольца испытывали вместе с упрочненными ионно-плазменным покрытием TiN/CrN для сравнительной оценки их склонности к изнашиванию.

Для определения характера и скорости изнашивания таких колец были проведены стендовые испытания на специализированной машине в условиях трения скольжения при возвратно-поступательном движении. В машину, по рассматриваемым вариантам, устанавливали по одному образцу гильзы цилиндров и по два образца (серийного и упрочненного), отобранных от поршневых колец. Подвижной деталью являлся образец гильзы цилиндров. Образцы гильзы цилиндров изготовлены из серого чугуна марки СЧ-ХНМР и подвергнуты фосфатированию (серийная технология).

Схема проведения испытаний образцов представлена в работе [1].

Постоянная скорость перемещения подвижных образцов для каждого варианта составляла 1,3 м/с. Величина удельного давления на рабочую кромку кольца достигала 0,8 МПа.

Длина рабочего хода образца гильзы цилиндров была принята 100 мм. Подача масла марки М14-В2 в зону трения составляла 1–2

капли в минуту. Общее время испытаний достигало 100 часов. Общая длина пройденного пути трения образцов составляла 468 км.

После испытаний была выполнена оптико-математическая оценка формируемых фаз по базовой методике в соответствии с ранее проведенными исследованиями [8–16]. Для этого была дополнительно предложена специальная компьютерная программа на основе интервалов относительной нейтральности абсолютной величины лапласианов и дивергенций, расчет которых производили по пятиточечной разностной схеме, представленной на рис. 1, в каждом пикселе изображения исследуемых зон кольца.

На первом этапе был выполнен расчет значений лапласианов по формуле (1) и дивергенций по формуле (2), в которых показатели значений каждой точки пятиточечной разностной схемы с соответствием n номерам от 1 до 5 (см. рис. 1). После этого была выполнена их подстановка в выражения (3) и (4) для подсчета значений нейтральности абсолютной величины лапласианов и дивергенций соответственно:

$$l = c_2 + c_3 + c_4 + c_5 - 4c_1, \quad (1)$$

$$\text{div} = c_2 + c_3 - 2c_1, \quad (2)$$

$$N_l = |l_1 + l_2 + l_3 + l_4| (|l_1| + |l_2| + |l_3| + |l_4|)^{-1}, \quad (3)$$

$$N_{\text{div}} = \frac{|\text{div}_1 + \text{div}_2 + \text{div}_3 + \text{div}_4|}{|\text{div}_1| + |\text{div}_2| + |\text{div}_3| + |\text{div}_4|}. \quad (4)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания на износ показали, что упрочнение ионно-плазменным покрытием обеспечивает повышение износостойкости таких колец в 15 раз (рис. 2) относительно серийных. После 72 часов испытаний на износ выявить потерю веса покрытия образца не представлялось возможным в связи с тем, что из-за разрушения упрочненной поверхности отмечалось локальное схватывание незначительного ко-

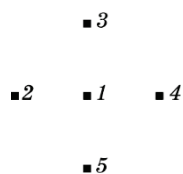


Рис. 1. Пятиточечная разностная схема.

Fig. 1. Five-point difference scheme.

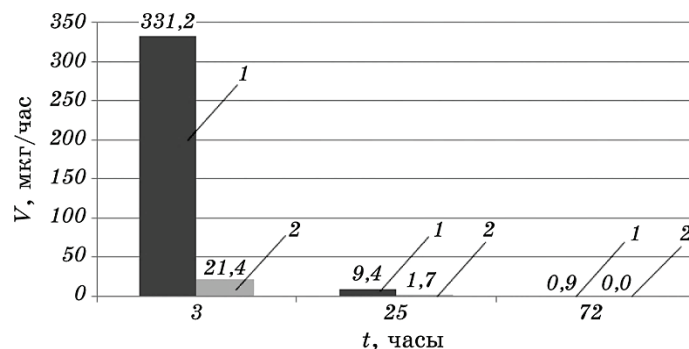


Рис. 2. Скорость изнашивания поршневых колец: 1 — серийные кольца, 2 — кольца с покрытием TiN/CrN.

Fig. 2. The rate of wear of piston rings: 1—serial rings, 2—TiN/CrN coated rings.

личества микрозон, которые не оказывали существенного влияния на изменение веса образца, поэтому влияние скорости изнашивания обозначили через «0,0» (см. рис. 2).

Вместе с тем, если судить по микротвердости дорожки трения (рис. 3), то следует отметить наличие износа на рабочей поверхности, который приближался к исходному металлу поршневого кольца. Аналогичная картина изменения микротвердости отмечалась и при испытании серийно применяемых поршневых колец с покрытием из олова, используемого для ускорения процесса приработки

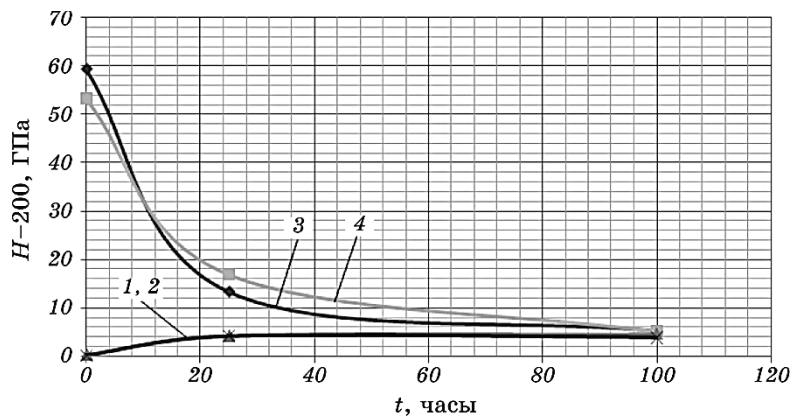


Рис. 3. Микротвердость поршневых колец: 1, 2 — серийные кольца, 3, 4 — кольца с покрытием TiN/CrN.

Fig. 3. Microhardness of piston rings: 1, 2—serial rings, 3, 4—TiN/CrN coated rings.

(см. рис. 3). Исходная микротвердость упрочненных колец в среднем в 175 раз выше, чем у серийных (см. рис. 3). На втором этапе испытаний она повышается в 3,5 раза, а на третьем — на 17% по сравнению с исходным значением.

После аппроксимации электронных микроскопических фотографий металла наклонной поверхности (прилегающей к зоне трения) и непосредственно зоны трения испытанных колец программа сформировала массив изображений, относящихся к определенным интервалам абсолютных величин нейтральности. Физическая суть нейтральности абсолютных величин дивергенций заключается в описании меры несжимаемости плотности фрагмента изображения, зоны его уплотнения и разряжения. Нейтральности абсолютных величин лапласианов описывают диффузию химических элементов. Установлено, что такой подход позволяет комплексно оценить влияние различных факторов на структурообразование на поверхности трения материала, в том числе и на уровень твердости и микротвердости [8]. Проведенные исследования позволяют оценить изменения, происходящие на поверхности трения поршневых колец в результате определенной величины нагружения, и установить связь с результатами испытаний.

В верхних левых углах рис. 4–7 находятся фотографии структур, которые оцифровываются, а остальные выявленные структуры относятся к следующим интервалам гистограмм:

- в верхнем ряду слева направо — изображения точек нейтральности абсолютной величины лапласиана — $0-1/9$, $1/9-2/9$, $2/9-3/9$, $3/9-4/9$;

- во втором ряду сверху продолжение изображения, относящихся к нейтральности абсолютной величины лапласиана следующего интервала — $4/9-5/9$, $5/9-6/9$, $7/9-8/9$, $8/9-1$;

- в третьем ряду слева направо приведены изображения точек структуры, относящиеся к интервалам гистограммы нейтральности абсолютной величины дивергенции — $0-1/9$, $1/9-2/9$, $2/9-3/9$, $3/9-4/9$ (в левом углу третьего ряда сверху — пустое место);

- в четвертом ряду сверху продолжение изображений, относящихся к нейтральности абсолютной величины дивергенции следующих интервалов — $4/9-5/9$, $5/9-6/9$, $7/9-8/9$, $8/9-1$.

Для каждого варианта кольца из сформированного массива изображений, программа рассчитала гистограммы абсолютных величин нейтральности наклонной поверхности и зоны трения, которые отображены по столбцам в табл. 1 согласно с представленным выше порядком интервалов.

После нахождения абсолютных величин нейтральности выполнили их сравнение по критерию Колмогорова, результаты которого представлены в табл. 2. Как видно из таблицы 2, при идентичных условиях испытаний характер изнашивания серийных и упрочнен-

ных колец существенно отличается. Об этом свидетельствует критерий сравнительных показаний, которые для зоны трения равны нулю, что подтверждается результатами испытаний (см. рис. 2).

Несмотря на то, что критерий сравнения для наклонных поверхностей колец больше нуля (2,7%), его малая величина указывает на

ТАБЛИЦА 1. Гистограммы абсолютных величин нейтральности наклонной поверхности и зоны трения поршневых колец.

TABLE 1. Histograms of the absolute values of neutrality of the inclined surface and the friction zone of the piston rings.

Зона трения		Наклонная поверхность, прилегающая к зоне трения	
Серийное поршневое кольцо	Кольцо с покрытием TiN/CrN	Серийное поршневое кольцо	Кольцо с покрытием TiN/CrN
15,1	15,2	12,7	13,1
18,5	16,5	14,5	16,2
14,2	13,4	11,7	12,7
14,0	13,0	11,7	12,8
9,3	8,7	9,2	9,0
7,9	8,1	9,0	8,3
6,4	6,4	6,8	6,8
4,9	5,1	6,1	5,7
3,3	3,8	4,7	4,4
2,1	2,7	3,7	3,1
1,4	2,1	2,7	2,5
0,9	1,6	2,2	1,7
0,8	1,1	1,5	1,3
0,5	0,9	1,3	1,0
0,3	0,6	0,8	0,6
0,2	0,5	0,6	0,4
0,1	0,3	0,4	0,3
0,0	0,1	0,2	0,1
0,0	0,0	0,0	0,0

ТАБЛИЦА 2. Относительное изменение абсолютных величин нейтральности согласно гистограмм разных зон поршневых колец.

TABLE 2. Relative change of absolute values of neutrality according to histograms of different piston rings zones.

Серийное поршневое кольцо	Кольцо с покрытием TiN/CrN	Критерий сравнения
Наклонная поверхность	Наклонная поверхность	0,027
Зона трения	Зона трения	0,000

низкую степень идентичности этих зон, не участвовавших в трении, а прилегающих к соответствующим областям.

Оптико-математической обработкой цифровых изображений

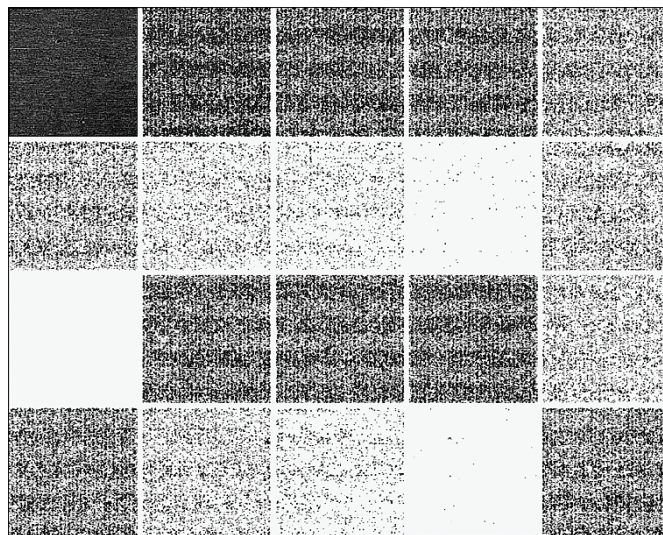


Рис. 4. Фотография зоны трения серийного поршневого кольца.

Fig. 4. Photo of the friction zone of a serial piston ring.

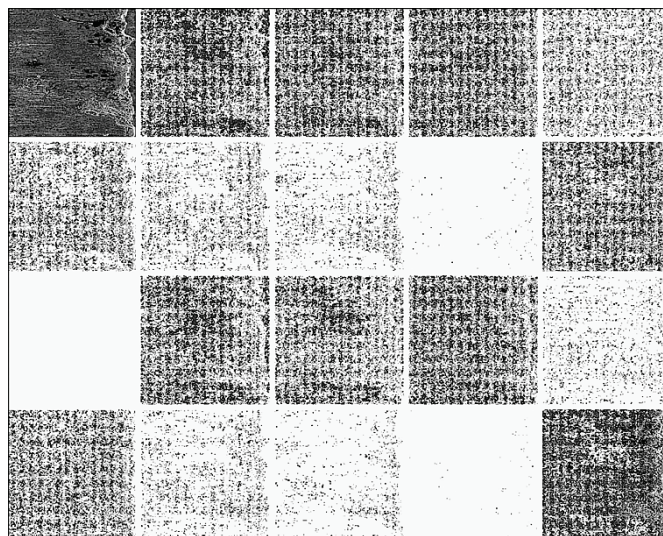


Рис. 5. Фотография зоны трения поршневого кольца с покрытием TiN/CrN.

Fig. 5. Photo of the friction zone of a piston ring coated with TiN/CrN.

формируемых при трении структур установлено, что после испытаний в зоне рабочей поверхности (см. рис. 4, 5) и примыкающей к ней наклонной поверхности (см. рис. 6, 7) для обоих вариантов поршневых колец формируются поперечные (перпендикулярно направлению скольжения) полосы, которые образуются под воздействием напряжений сжатия и растяжения. Выявленные продольные полосы, шириной и периодом ~ 70 мкм, на поверхности трения серийного кольца (см. рис. 4) указывают на высокий уровень влияния процесса изнашивания и, как следствие, определяют структуризацию металла. Периодичность и ширина поперечных полос на прилегающей поверхности кольца с ионно-плазменным покрытием (см. рис. 7) составляет в среднем ~ 10 мкм. Следует отметить повышенную в этом случае контрастность полос на поверхности трения такого кольца, ширина и период которых составляют ~ 20 мкм и определяют высокие стойкость и сопротивление изнашиванию по сравнению с аналогичной областью серийного кольца, в которой ширина и период поперечных полос не превышают ~ 10 мкм. При этом, наличие продольных полос в этом варианте кольца не выявлено.

В зоне наклонной поверхности серийного кольца наблюдаемые поперечные полосы имеют период и ширину, величины которых составляют ~ 5 мкм. Высокая частота чередования полос отвечает за область непосредственного изменения структуры поверхности, в

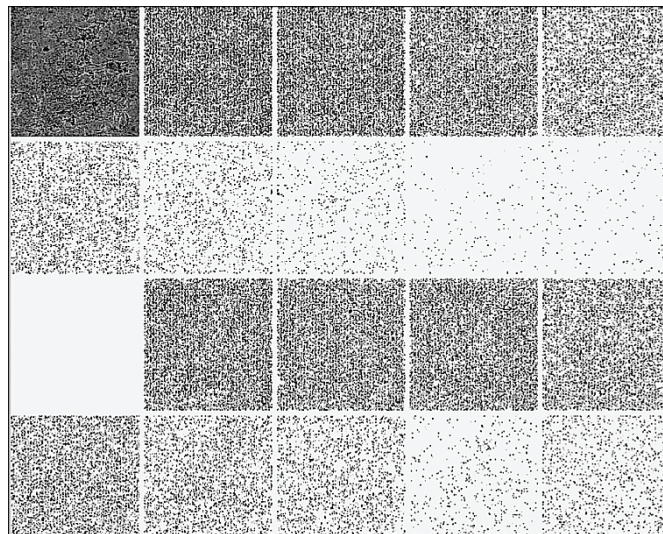


Рис. 6. Фотография наклонной (прилегающей) поверхности серийного поршневого кольца.

Fig. 6. Photograph of an inclined (adjacent) surface of a serial piston ring.

данном случае из-за процессов циклического воздействия в условиях повышения температуры трения до 70°C (измерено в процессе эксплуатации). Наличие полос в зоне, прилегающей к области трения, можно объяснить локализацией деформации согласно принципу Сен-Венана [17, 18].

Одновременно с этим выявлен факт ярко выраженной структуризации поверхности серийного кольца покрытого оловом в наклонной области, прилегающей к зоне трения, протяженностью ~ 0,45–0,5 мм (см. рис. 6). Это также свидетельствует о деградации основного металла и низкой его стойкости к циклическому воздействию, которое принимает характер ударной волны и выражается в появлении чередующихся полос (см. рис. 6). При этом, у колец с ионно-плазменным покрытием похожей структуризации наклонной поверхности не наблюдается (см. рис. 7), что объясняется высокой степенью сопротивления покрытия развитию и распространению деформаций, вызванных циклическим воздействием при трении, а также попаданием в очаг трения дополнительной смазки — графита, который практически надежно не фиксируется упрочненным покрытием. Такой графит не оказывает отрицательного влияния на процесс трения, а является смазкой как и в исходном поршневом кольце.

Высокая стойкость против изнашивания определяется микро-

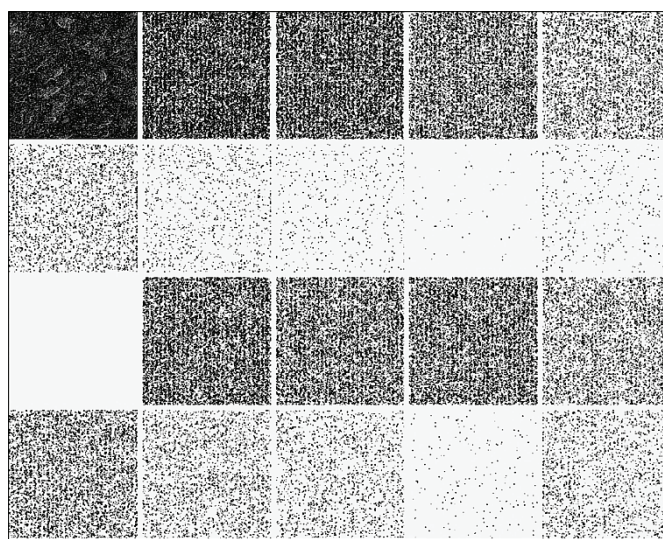


Рис. 7. Фотография наклонной (прилегающей) поверхности поршневого кольца с покрытием TiN/CrN.

Fig. 7. Photograph of an inclined (adjacent) surface of a TiN/CrN coated piston ring.

структурой, химическим и фазовым составом, физико-механическими свойствами и напряженным состоянием материала зон контактного взаимодействия пары трения. Для подтверждения нового подхода математического описания структурообразования дополнительно оценили концентрационные изменения компонентов в локальных зонах трения.

На рисунке 8 и в таблице 3 приведен сопоставительный микро-рентгеноспектральный анализ поперечных зон износа (сжатия — спектры 4, 5 и разряжения — спектр 6), которые характеризуются различным содержанием компонентов. Так, зоны сжатия насыщают перемещающиеся более твердые упрочняющие фазы TiN, которые, как и CrN, довольно однородно распределяются в них 14,27–15,67% и 51,58–60,45 % соответственно. Что касается зоны сброса энергии (разряжения), то в ней доля этих упрочняющих фаз снижается в ~ 2,0 и 3,0 раза соответственно.

При этом количество азота не всегда изменяется в соответствии с основными упрочняющими компонентами. Это даёт основание предположить возможность формирования различных типов нитридов — Cr_2N , CrN или TiN_{1-n} [19].

Анализ продольной зоны прилегающей к области трения также указывает на повышенное содержание упрочняющих фаз покрытия. Эти области также имеют схожие доли Cr, Ti и N, которые из-

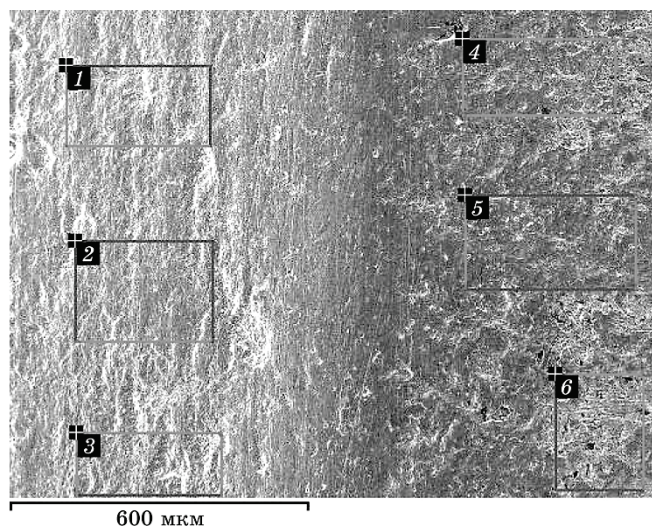


Рис. 8. Микрорентгеноспектральный анализ наклонной поверхности (спектры 1, 2, 3) и локальных зон трения (спектры 4, 5, 6) упрочненного поршневого кольца.

Fig. 8. Micro X-ray analysis of the inclined surface (spectrum 1, 2, 3) and local friction zones (spectrum 4, 5, 6) of the hardened piston ring.

ТАБЛИЦА 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа наклонной поверхности (спектры 1, 2, 3) и локальных зон трения (спектры 4, 5, 6) упрочненного поршневого кольца.

TABLE 3. Results of micro X-ray analysis of the inclined surface (spectrum 1, 2, 3) and local friction zones (spectrum 4, 5, 6) of the hardened piston ring.

Спектр	N, %	O, %	Al, %	Si, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %
1	9,17	—	—	0,07	16,85	73,59	0,31
2	9,10	—	—	0,09	16,89	73,71	0,22
3	9,98	—	—	0,07	16,72	72,92	0,31
4	19,19	—	0,13	0,41	14,27	51,58	14,41
5	16,67	4,19	0,12	0,11	15,67	60,45	2,79
6	7,49	8,04	0,48	1,13	6,94	20,90	55,02

меняются в узких пределах: 72,92–73,71%, 16,72–16,89% и 9,10–9,98% соответственно (см. рис. 8 и табл. 3, спектры 1, 2, 3).

Такие комплексные исследования позволили описать характер формирования напряженного состояния при эксплуатации поршневых колец.

4. ВЫВОДЫ

Предложена и изучена технология упрочнения поршневых колец многослойным ионно-плазменным покрытием TiN/CrN. Осаждение покрытия осуществляли при токе дуги $I_d = 100$ А и напряжении смещения подложки $U_{см} = -200$ В. Поочередно наносили 6 слоев CrN и 5 — TiN, предварительно распылив подслоя чистого Cr толщиной ~ 50 нм. При этом толщина первого слоя TiN составляла 49 нм, а слоя CrN — 240 нм. Соотношение CrN/TiN составило 5,8. Общая толщина многослойного покрытия — 1,7 мкм.

Изучены особенности изнашивания маслосъемных колец. Результаты испытаний колец с многослойным ионно-плазменным покрытием выявили, что в среднем износостойкость повышается в 15 раз. Этому способствует повышение микротвердости поверхности трения до 59 ГПа и сохранение влияния графитовой смазки в очаге трения.

Методом оптико-математического моделирования выявлены поперечные и продольные полосы, отвечающие за структуризацию упрочненных поверхностей. Для зоны трения кольца с покрытием TiN/CrN характерны более широкие поперечные полосы (~ 20 мкм) по сравнению с аналогичной областью серийного кольца (~ 10 мкм).

Изучены особенности структурных изменений методом микро-

рентгеноспектрального анализа, которые выявили, что формирование зон сжатия и разряжения, связанных с циклическим воздействием на рабочую поверхность поршневого кольца, сопровождается существенным перераспределением упрочняющих компонентов фаз. В зоне сжатия их доля на поверхности трения возрастает в 2–4 раза по сравнению с областью разряжения (сброса энергии).

Выявленный характер структуризации наклонной поверхности, прилегающей к рабочей кромке поршневого кольца, на величину близкую к высоте пояска ($\sim 0,45\text{--}0,5$ мм) свидетельствует о низкой стойкости основного металла серийных колец к циклическому воздействию.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, E. A. Satanovskii, A. K. Oleinik, and T. V. Mal'tsev, *Materials Science*, **53**, Iss. 4: 501 (2018).
2. R. M. Muratov and A. V. Taran, *J. Adv. Microsc. Res.*, **12**, No. 3: 203 (2017).
3. Yu. N. Nezovibat'ko, G. S. Poklipach, O. M. Svets, V. S. Taran, V. I. Tereshin, and A. I. Timoshenko, *J. Appl. Plasma Science*, **13**: 87 (2005).
4. S. S. Grankin, U. S. Nemchenko, V. Yu. Novikov, O. V. Sobol', L. V. Malikov, and S. I. Pliev, *J. Surface Physics and Engineering*, **12**, No. 2: 308 (2014) (in Russian).
5. L. A. Dobrzański and L. W. Żukowska, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, **44**, Iss. 2: 115 (2011).
6. G. G. Bejarano, B. M. Gomez, A. J. Osorio, B. J. Caicedo, and C. W. Aperador, *J. Mater. Sci. Eng.*, **4**, No. 6: 51 (2010).
7. V. M. Beresnev, A. D. Pogrebnyak, O. M. Shvets, E. V. Fursova, N. N. Chernyshov, and L. V. Malikov, *Visnyk Kharkivs'kogo Universytetu. Seriya Fizychna 'Yadra, Chastynky, Polya'*, No. 777: 93 (2007) (in Russian).
8. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin, and A. I. Sidashenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 255 (2018) (in Russian).
9. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, and E. L. Belkin, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, **78**, No. 6: 35 (2012) (in Russian).
10. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin, and O. I. Trichevsky, *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Resursozberihayuchi Tekhnologiyi, Materialy ta Obladnannya u Remontnomu Vyrobnystvi*, **168**: 174 (2016) (in Russian).
11. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, and E. L. Belkin, *Stal'*, No. 3: 46 (2012) (in Russian).
12. O. I. Trichevsky, T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, and E. L. Belkin, *Promyshlennost' v Fokuse*, No. 7: 52 (2015) (in Russian).
13. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, and E. L. Belkin, *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Problemy Nadiynosti Mashyn ta Zasobiv Mekhanizatsiyi s/h Vyrobnystva*, **151**: 183 (2014) (in Russian).
14. T. V. Mal'tsev, *Technical Service of Agriculture, Forestry and Transport Systems*, No. 10: 80 (2017) (in Russian).
15. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin, and A. I. Sidashenko, *International J. Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **2**, Iss. 3: 34 (2017).

16. T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin, and A. I. Sidashenko, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, **83**, No. 5: 27 (2017) (in Russian).
17. Yu. N. Rabotnov. *Soprotivlenie Materialov* [Strength of Materials] (Moscow: Fizmatgiz: 1963) (in Russian).
18. V. V. Kalashnikov and M. I. Karyakin, *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*, **47**, No. 6: 129 (in Russian).
19. K. Narita, *Kristallicheskaya Struktura i Svoystva Nemetallicheskikh Vkhlyucheniye v Stali* [Crystal Structure and Properties of Non-Metallic Inclusions in Steel] (Moscow: Metallurgy: 1969) (in Russian).