

УДК 621.793

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ КЛАПАНОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОПОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Д.Н. Коротаев<sup>1</sup>, К.Н. Полещенко<sup>2</sup>, П.Б. Гринберг<sup>2</sup>, Е.Е. Тарасов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, Россия;

<sup>2</sup>Омский научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей (НИИД), Омск, Россия;

<sup>3</sup>ФГУП ФНПЦ «Прогресс», Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На основе исследования топологии покрытий, созданных ионно-плазменным напылением поверхностей сталей, применяемых для клапанов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), проведена цифровая обработка изображений и расчет спектров мультифрактальных размерностей.

**Результаты.** Выполнена количественная оценка структурных изменений, полученных на различных энергетических режимах ионно-плазменного напыления.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что комплексные показатели мультифрактальных размерностей можно использовать для прогнозирования и оптимизации режимов ионно-плазменной обработки с целью формирования износостойких покрытий на автомобильных деталях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ионно-плазменное напыление, клапан ДВС, топокомпозитные покрытия, нанокластерная технология, мультифрактальная параметризация.

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация перевозок пассажиров и различных грузов обусловлена совершенствованием ремонта автомобильного транспорта, эксплуатационная надёжность которого напрямую зависит от применения прогрессивных методов восстановления работоспособности агрегатов и систем автомобилей.

Одним из наиболее экономичных вариантов обеспечения требуемого уровня работоспособности автомобилей является ремонт агрегатов и восстановление геометрических размеров деталей. Для этих целей широко используются методы газоплазменного, плазменного напыления и различные способы наплавки. Однако в процессе наплавки и напыления могут возникать дефекты, в том числе трещины и поры, которые снижают эксплуатационную надёжность покрытия, а в некоторых случаях способствуют аварийному выходу детали из строя. Для предотвращения внезапного разрушения используются технические решения, объединяющие вышеуказанные методы с методами лезвийной обработки и поверхностного пластического деформирования, достаточно хорошо изученные.

Одним из прогрессивных и эффективных по соотношению цена/качество методов, обеспечивающих работоспособность и повышение ресурса деталей, которые эксплуатируются в условиях абразивного, адгезионного, коррозионного и фреттинг-усталостного изнашивания, является ионно-плазменное нанесение топокомпозитных покрытий [1].

Наноструктурные топокомпозитные покрытия (НСТКП), полученные с использованием ионно-плазменной нанокластерной технологии (ИПНКТ), обеспечивают надёжность изделий и узлов за счет повышения усталостной прочности, износостойкости, сохраняют работоспособность в активных и агрессивных средах [2]. Это позволяет рассматривать ИПНКТ в качестве перспективной технологической операции на стадии финишной обработки в процессах восстановления и упрочнения деталей автотранспортной техники, в частности клапанов двигателей внутреннего сгорания.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используемые материалы для клапанов двигателей внутреннего сгорания должны сопротивляться действию повторных динамических нагрузок при высоких температурах (до

900 °С), иметь достаточно высокую поверхностную твердость, противостоять разьедающему действию продуктов сгорания, обладать достаточной теплопроводностью и ограниченным коэффициентом термического расширения. Кроме того, клапанная сталь во избежание хрупкости не должна закаливаться на воздухе при охлаждении клапана с его рабочих температур. Лучшие клапанные стали марок X14N14B, X14N14BC, а также сталь марки 55X20G9AN4, обладающая высокой твердостью, достигающей 500 НВ, характеризуются высокой хрупкостью. Таким образом, ни одна из известных марок стали, всем перечисленным требованиям в полной мере не удовлетворяет.

Вместе с тем результаты апробации материалов и изделий с наноструктурными топокомпозитными покрытиями показали, что посредством использования нанокластерной технологии достигается повышение эксплуатационных свойств исследуемых объектов в широком диапазоне температурно-скоростного нагружения. Результаты испытаний показали, что наноструктурные топокомпозитные покрытия обеспечивают высокую микротвердость поверхности (до 1 800–2 500 кгс/мм<sup>2</sup>), низкую склонность к схватыванию и пониженный (в 2–4 раза) коэффициент трения по сравнению с немодифицированными изделиями. Эти характеристики обеспечивают повышение эрозионной стойкости поверхности деталей до 50% при абразивном изнашивании. Кроме того, НСТКП имеют пониженный электрохимический потенциал, что способствует снижению интенсивности коррозионных процессов разрушения поверхностных слоев деталей в процессе их эксплуатации.

Структурно-фазовые состояния покрытий, сформированных при ионно-плазменном воздействии, характеризуются высокой плотностью дефектов, субзеренной структурой с различной степенью упорядоченности, а также наличием ультрадисперсной кристаллической структуры, содержащей нанофазные образования. При определенных условиях ионно-плазменной обработки поверхность покрытий характеризуется специфической топологией, отличающейся наличием кластерных образований.

Как было установлено ранее [3], эксплуатационное поведение конструктивных элементов с наноструктурными топокомпозитными покрытиями зависит от их структурно-морфологических характеристик [1,2,3]. В связи с этим особую актуальность приобретает решение задачи установления надежных кор-

реляций между технологическими режимами ионно-плазменной обработки, топологическими характеристиками поверхности покрытий и эксплуатационными свойствами модифицированных деталей.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Установление взаимосвязей между мультифрактальными параметрами топокомпозитных покрытий, режимами ионно-плазменной обработки и эксплуатационными свойствами модифицированных изделий для совершенствования технологии упрочнения и восстановления клапанов двигателей внутреннего сгорания.

### СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Ионно-плазменное воздействие на металлические материалы проявляется в первую очередь как мощный тепловой источник, инициирующий развитие высоких температур, их градиентов, ударных импульсов, а также сверхскоростных процессов нагрева и охлаждения, которые определяют динамику неравновесных структурных превращений и особенности формируемой топологии поверхности. В таких условиях для получения наиболее полной информации о результатах структурообразования кроме экспериментальных металлографических и электронно-микроскопических исследований требуются методы количественного анализа модифицированных поверхностей.

Эффективным способом визуализации и количественного описания структур является мультифрактальная параметризация (МФП), с помощью которой возможно охарактеризовать образование покрытий при различных внешних воздействиях [4, 5]. МФП с помощью спектра мультифрактальных размерностей позволяет описать системы со сложной и неоднородной структурой, к числу которых относятся покрытия, созданные ионно-плазменной обработкой материалов.

По спектрам мультифрактальных размерностей количественно оценивают не только конфигурацию исследуемой структуры в целом, но и определяют комплексные показатели, характеризующие упорядоченность, однородность и периодичность в структурной организации материала [6].

В качестве мер для вычисления фрактальных и мультифрактальных параметров структуры материалов используют количество микроструктурных объектов на единичной площади металлографического шлифа, размер

зерен, их площадь и длину периметра границ, уровень темно-серого оттенка и т.п. [4,5,6].

На основе спектра мультифрактальных размерностей можно вычислить комплексный показатель

$$\Delta_q = D_1 - D_q,$$

где  $q$  – целочисленная величина от  $-\infty$  до  $+\infty$ , используемая для генерации мультифрактальных характеристик.

Отдельные составляющие спектра мультифрактальных размерностей  $D_q$  и  $f(\alpha_q)$  характеризуют структурно-энергетическое состояние материала и полноту информационного описания, а комплексные показатели  $\Delta_q$  – степень упорядоченности, периодичности и однородности его структуры [4].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ионно-плазменная обработка осуществлялась на модернизированной установке ННВ-6.6 с использованием трехкатодной системы, позволяющей осуществлять активацию поверхности за счет ее распыления под разными углами, а также наносить покрытия различного состава [4]. Режимы ионно-плазменного модифицирования приведены в таблице 1. В качестве материалов катодов использовались сплавы ВТ1-0, Х99А и А99. Обработке подвергались образцы из стали Х14Н14ВС широко используемой в качестве материала для выпускных клапанов. Испытания на износостойкость проводились на виброустановке, позволяющей оценивать износостойкость образцов в условиях окислительных и колебательных процессов. Методика эксперимента и обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с общепринятыми рекомендациями [7]. Принимались следующие условия испытаний на износостойкость: давление  $P = 4$  МПа; скорость перемещения  $V = 1$  м/с; время испытания  $t = 60$  мин; частота колебаний  $f = 10$  Гц, амплитуда перемещений  $A_p = 0,2$  мм.

Для изучения топологии поверхности использовался растровый электронный микроскоп JEOL. Были получены изображения поверхностей в зависимости от варьируемых режимов ионно-плазменной обработки. На основе анализа полученных данных определялись соответствующие режимам ионно-плазменного воздействия структурно-морфологические типы покрытий.

Расчет спектра мультифрактальных размерностей осуществлялся с помощью программы MFRDrom, разработанной Институтом металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Для этого из оцифрованных изображений исследуемых микроструктур вырезались фрагменты размером 250x250 пикселей, и с них снималась контрастная маска. По полученным изображениям определялись мультифрактальные показатели структурной организации материала. Генерация спектра мультифрактальных размерностей осуществлялась в диапазоне  $0 < q < +40$ .

В качестве основных показателей для структурного анализа принимались фрактальная размерность самоподобия  $D_0$ , информационная размерность  $D_1$ , корреляционная размерность  $D_2$ , пороговая устойчивость  $D_{40}$ , а также  $\Delta_{40}$ ,  $\alpha_{40}$  и  $f_{40}$ . Комплексный показатель  $\Delta_{40}$  характеризует упорядоченность,  $\alpha_{40}$  – периодичность и устойчивость структурного состояния,  $f_{40}$  – однородность структуры.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены изображения изменения структуры покрытий после ионно-плазменной обработки, на основе которых рассчитывались МФП структур.

Характеристика  $D_{40}$  содержит количественную информацию о термодинамических условиях формирования изучаемых структур. Чем выше значение  $D_{40}$ , тем больше значения энтропии, поэтому величина  $D_{40}$  может приме-

Таблица 1  
РЕЖИМЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
Table 1  
MODES OF ION-PLASMA MODIFICATION

Номер режима	Напряжение на подложке U, В	Ток разряда I, А	Температура нагрева, ° С	Реактивный газ
1	80–90	70–80	300–320	Азот
2	100–120	80–85	370–390	Азот
3	180–200	100–110	400–420	Азот
4	600–620	120–140	450–470	Азот
5	900–920	180–200	600–650	Азот

няться для распознавания изучаемых структур материалов. Под степенью однородности  $f_{40}$  понимается показатель характера распределения единичных элементов рассматриваемой структуры в евклидовом пространстве, охватывающем эту структуру. Чем больше  $f_{40}$ , тем структура более однородна для канонических вариантов спектров. Показатель  $\Delta_{40}$  отражает степень упорядоченности и нарушения симметрии для общей конфигурации ис-

следуемой структуры в целом. Увеличение  $\Delta_{40}$  показывает, что в структуре становится больше периодической составляющей и в ней возрастает степень нарушенной симметрии. Показатель  $\alpha_{40}$ , характеризующий периодичность и устойчивость структурного состояния, больше отвечает за дальнюю упорядоченность. Этот параметр показывает, что сформированные покрытия обладают близкой структурной устойчивостью.

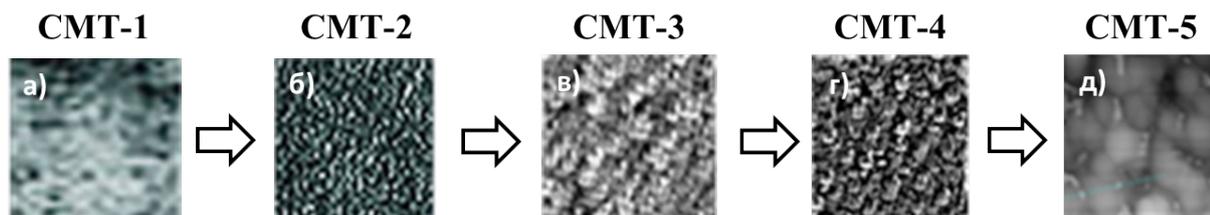


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические изображения структуры покрытий: а), б), в), г), д) соответствуют режимам 1,2,3,4,5 ионно-плазменной обработки ( $\times 4020$ ). Обозначения: СМТ – структурно-морфологический тип покрытия, соответствующий режимам 1,2,3,4,5, приведенным в таблице 1.  
Figure 1 – Electronically microscopic images of the coatings' structure: а), б), в), г), д) correspond to 1,2,3,4,5 modes of the ion-plasma treatment ( $\times 4020$ ). Notes: SMT is a structural morphological type of coating, corresponding to 1,2,3,4,5 modes, given in the Table 1.

На рисунке 2 представлены расчетная таблица мультифрактальных параметров структуры и полученные с изображений канонические спектры, которые соответствуют типичному виду мультифрактальных кривых [5].

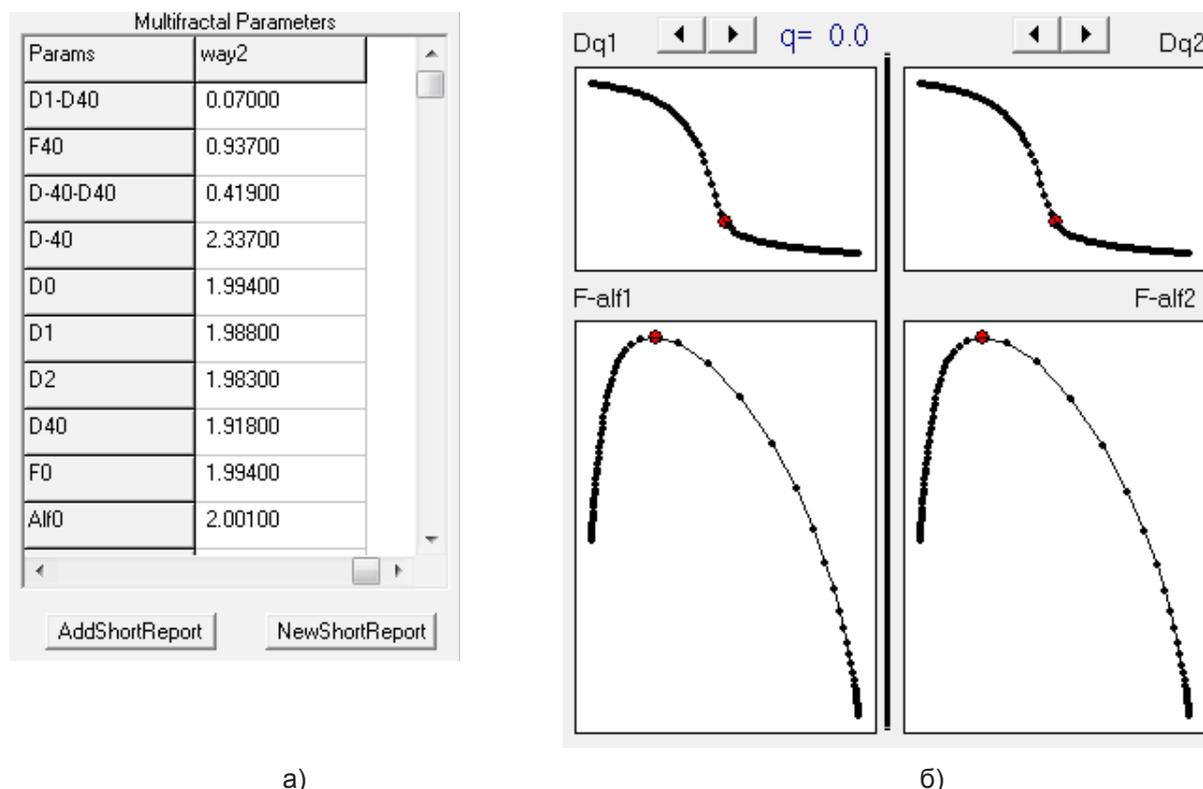


Рисунок 2 – Пример расчета мультифрактальных параметров (а) и вид мультифрактальных спектров (б)  
Figure 2 – Example of the multifractal parameters' calculation (а) and the form of multifractal spectra (б)

По характеру изменения мультифрактальных спектров можно заключить, что структурные изменения в результате ионно-плазменного воздействия реализуются по единым алгоритмам, отличаясь незначительно на количественном уровне.

Основные мультифрактальные характеристики поверхностно-модифицированных слоев, рассчитанные с помощью программы MFRDrom, приведены в таблице 2.

Показателями присутствия фрактальных свойств у поверхностей являются соответствующие

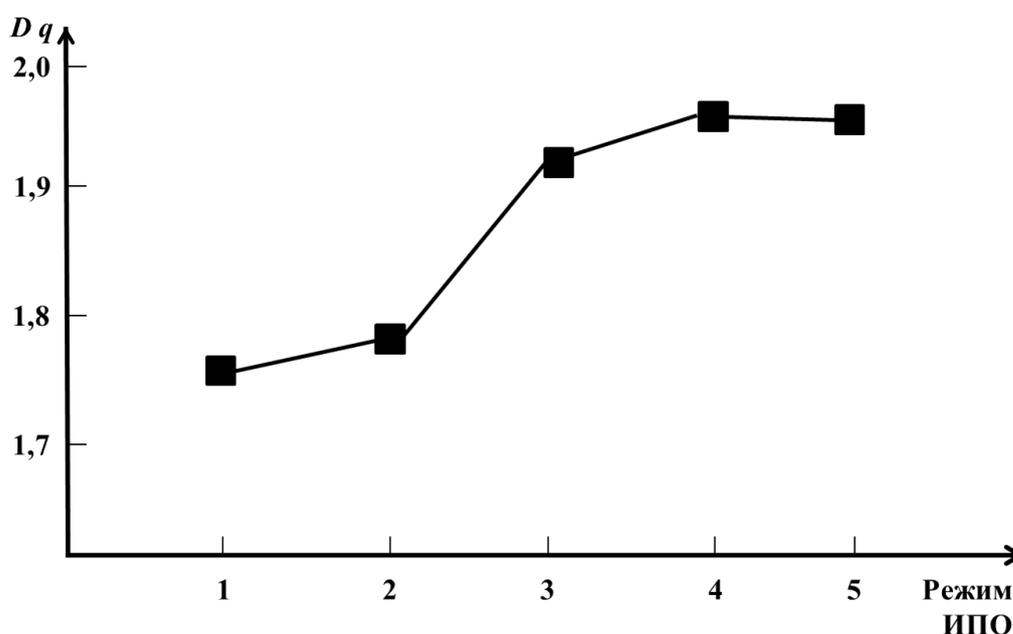
величины размерности самоподобия  $D_0 = 1,991 - 2,013$  и пороговая устойчивость  $D_{40} = 1,781 - 1,932$ , так как известно, что материалы не испытывающие никаких изменений, не переходят порог перколяции составляющий  $D_{40} = 1,757$  [6].

Для исследуемых структур покрытий установлено, что при обработке поверхностей образцов на режимах 4 и 5 показатель  $\Delta_{40}$ , характеризующий структурную упорядоченность, имеет минимальные значения.

Таблица 2  
ЗНАЧЕНИЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ  
Table 2  
VALUES OF THE COATINGS' MULTIFRACTAL PARAMETERS AFTER ION-PLASMA TREATMENT

Параметр	Номер режима				
	1	2	3	4	5
$\Delta_{40}$	0,193	0,186	0,088	0,055	0,070
$f_{40}$	0,347	0,236	0,167	0,919	0,937
$D_0$	1,993	2,013	1,996	1,991	1,994
$D_1$	1,974	1,985	1,991	1,987	1,988
$D_2$	1,955	1,957	1,986	1,984	1,983
$D_{40}$	1,781	1,799	1,903	1,932	1,918
$\alpha_{40}$	1,745	1,760	1,859	1,907	1,893

На рисунке 3 приведено влияние режимов ионно-плазменной обработки на комплексный мультифрактальный показатель структуры  $D_{40}$  и скорость изнашивания покрытия.



Рисунке 3 – Влияние режимов ионно-плазменной обработки (ИПО) на мультифрактальный параметр структуры  $D_{40}$   
Figure 3 – Influence of ion-plasma treatment modes (IPO) on the multifractal parameter of the  $D_{40}$  structure

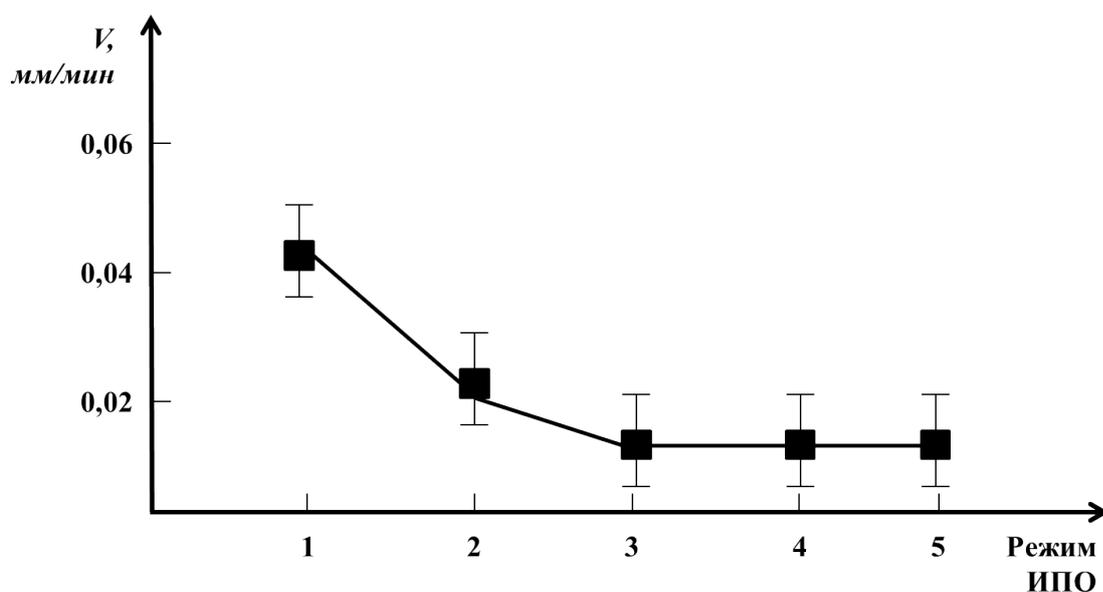


Рисунок 4 – Влияние режимов ионно-плазменной обработки (ИПО) на скорость изнашивания стали с наноструктурным топокомпозитным покрытием  
Figure 4 – Influence of ion-plasma treatment (IPO) modes on the wear rate of steel with nanostructured topocomposite coating

Установлено, что в диапазоне развития наиболее однородной структуры (таблица 2) с максимальным порогом устойчивости (рисунок 3) и наименьшей упорядоченностью (таблица 2) располагается минимум скорости изнашивания покрытия, сформированного ионно-плазменной обработкой на режимах 4 и 5.

## ВЫВОДЫ

1. Электронно-микроскопические исследования структуры покрытий при различных режимах ионно-плазменной обработки и количественная оценка их микроструктурных параметров с помощью спектра мультифрактальных размерностей позволили установить закономерности изменения топологии поверхности.

2. На основе проведенного мультифрактального анализа установлено, что наиболее чувствительными характеристиками к режимам ионно-плазменного воздействия являются степень однородности  $f_{40}$  и структурной упорядоченности  $\Delta_{40}$ .

3. В результате проведенного исследования установлена взаимосвязь между комплексными параметрами спектра мультифрактальных размерностей структур, сформированных ионно-плазменным модифицированием, и эксплуатационными свойствами изделий с наноструктурными покрытиями. Показано,

что минимальное значение скорости изнашивания сталей с топокомпозитными покрытиями достигается в области развития наименее упорядоченной микроструктуры и наибольшей пороговой устойчивости.

4. Результаты проведенного исследования выявили корреляцию между режимами ионно-плазменной обработки, мультифрактальными параметрами наноструктурных покрытий и физико-механическими свойствами модифицированных изделий, которые можно использовать в качестве рекомендаций при разработке технологий упрочнения и восстановления деталей автотранспортной техники.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гринберг П.Б., Горюнов В.Н., Полещенко К.Н., Тарасов Е.Е. Инновационные методы и технологии повышения ресурса трибосопряжений // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: матер. Международного конгресса. Омск: СибАДИ, 2013. Кн. 3. С.352–355.
2. Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Суриков В.И. Разработка и получение наноструктурных топокомпозитов // Вестник СибАДИ. 2015. № 3(43). С.39–45.
3. Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е. Структурно-морфологические особенности наноструктурных топокомпозитных покрытий триботехнического назначения // Вестник СибАДИ. № 4 (50). 2016. С.126–132.
4. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. М.- Ижевск: научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 116 с.
5. Korotaev D.N., Ivanova E.V., Kim V.A. Fractal parametrization in erosion process and surface investigation

received by electrosark modification/ Journal of Physics: Conference Series. № 858 (2017). С. 012016.

6. Русинов П.О., Бледнова Ж.М. Структурные и технологические закономерности формирования поверхностных слоев из материалов с эффектом памяти формы высокоскоростным газопламенным напылением // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2014. № 6. С. 322–329.

7. ГОСТ 23.211–80 – «Обеспечение износостойкости

изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии».

**Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ проекта № 11.11760.2018/11.12.**

## IMPROVEMENT OF THE ION-PLASMA DUSTING METHOD OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINES' VALVES BASING ON THE TOPOCOMPOSITE COVERINGS' MULTIFRACTAL ANALYSIS

*D.N. Korotaev, K.N. Poleshchenko, P.B. Grinberg, E.E. Tarasov*

### ABSTRACT

**Introduction.** Digital image and calculation of multifractal dimension spectra are carried out in the research basing on the investigation of the coatings' topology, which are created by ion-plasma spraying on steel surfaces and used for internal combustion engine (ICE) valves.

**Results.** Quantitative assessment of the structural changes received on the different power modes of ion-plasma dusting is executed in the article.

**Discussion and conclusion.** It is concluded that complex indicators of multifractal dimensions could be used for forecasting and optimization of the ion-plasma processing modes for the purpose of anti-wear coatings on automobile parts at the repair process forming.

**KEYWORDS:** automobile parts, ion-plasma dusting, ICE valve, topocomposite coverings, nanocluster technology, multifractal parametrization.

### REFERENCES

1. Grinberg P.B., Goryunov V.N., Poleschenko K.N., Tarasov E.E. Innovacionnie metodi i tehnologii povsheniya resursa tribosopryajenii [Innovative methods and technologies to increase the life of tribo-joints]. *Arhitektura. Stroitelstvo. Transport. Tehnologii. Innovacii. Mater. Mejdunarodnogo kongressa*. Omsk.SibADI, 2013. Kn. 3, pp.352 - 355.

2. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Poleschenko K.N., Surikov V.I. Razrabotka i poluchenie nanostrukturnih topokompozitov [Development and production of nanostructured topocomposites]. *Vestnik SibADI*, 2015, no. 3 (43), pp.39 - 45.

3. Poleshchenko K.N., Korotaev D.N., Tarasov E.E. Strukturno-morfologicheskie osobennosti nanostrukturnykh topokompozitnykh pokrytij tribotekhnicheskogo naznacheniya [Structural-morphological features of nanostructural topokompozitny coverings of tribotechnical appointment]. *Vestnik SibADI*, no. 4 (50), 2016 pp.126-132.

4. Vstovskij G.V., Kolmakov A.G., Bunin I.ZH. Vvedenie v mul'tifraktal'nyuy parametrizatsiyu struktur materialov [Introduction to multifractal parametrization of material structures]. Moscow, Izhevsk: nauchno-izdatel'skij tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika». 2001. 116 p.

5. Korotaev D.N., Ivanova E.V., Kim V.A. Fractal parametrization in erosion process and surface investigation received by electrosark modification. *Journal of Physics: Conference Series*, no. 858 (2017) С. 012016.

6. Rusinov P.O., Blednova ZH.M. Strukturnye i tekhnologicheskie zakonomernosti formirovaniya poverkhnostnykh sloev iz materialov s ehffektom pamyati formy vysokoskorostnym gazoplamenym napyleniem [Structural and technological regularities in the formation of surface layers from materials with shape memory effect by high-speed gas-flame deposition]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*, 2014, no. 6, pp. 322-329.

7. ГОСТ 23.211–80 – «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии» [State standart 23.211-80 - "Provision of wear resistance of products. Method for testing materials for wear during fretting and fretting corrosion].

**Поступила 24.11.2017, принята к публикации 20.04.2018.**

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Коротаев Дмитрий Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве», ФГБОУ ВО СибАДИ (644080, г.Омск, пр-т Мира, 5, e-mail: korotaevd99@mail.ru).*

*Korotaev D. Nikolaev (Omsk, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Economy and Project Management in Transport Construction", SIBADI (644080, Omsk; 5, Mira Ave., e-mail: korotaevd99@mail.ru).*

*Полещенко Константин Николаевич (Омск, Россия) – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Омского научно-исследовательского института организации и технологии производства двигателей (НИИД) (644021, г. Омск, ул. Богдана Хмельницкого, 283, e-mail: oniid@mail.ru).*

*Poleshchenko K. Nikolaev (Omsk, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Omsk Institute of the Organization and Production Technology of Engines (644009, Omsk; 195/18, 10 years of October St., e-mail: omsk@rea.ru).*

*Гринберг Петр Борисович (Омск, Россия) – генеральный директор Омского научно-исследовательского*

