

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Колмаков А.Г., Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сениуть В.Т.,  
Ивашко В.С., Лойко В.А., Клименко С.А.

(ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Президиум НАН Беларуси, ОАО НПО «Центр»  
НАН Беларуси, ОИМ НАН Беларуси, БНТУ, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины,  
г. Москва, г. Минск, г. Киев, Россия, Беларусь, Украина)  
Тел./Факс: +7 (499) 135 20 60; E-mail: [kolmakov@imet.ac.ru](mailto:kolmakov@imet.ac.ru)  
Тел./Факс: +375 (017) 2841822; E-mail: [mlk-z@mail.ru](mailto:mlk-z@mail.ru)  
Тел./Факс: +380 (44) 430 85 00; E-mail: [atmu@ism.kiev.ua](mailto:atmu@ism.kiev.ua)

**Abstract:** *With regard to the wear-resistant coating the multifractal parameters of their structure with the original chemical constituents, the hardness and ability of the coatings to adapt to external loading were established. It was shown that the multifractal parameterization of the structure should be used for the optimization of the technological processes for the manufacturing of the wear-resistant coatings, working in the given operating conditions.*

**Keywords:** *details renovation, multifractal parameterization, wear-resistant coating, material structure*

**Введение.** Технологические основы ресурсо- и энергосберегающих процессов обработки, упрочнения и восстановления поверхностей и основы рациональной эксплуатации и реновации деталей охватывают проектно-конструкторские, производственно-технологические и эксплуатационно-обслуживающие этапы жизненного цикла изделий [1]. Технологические и эксплуатационные основы строятся на методологии принятия проектных решений на ключевых этапах жизненного цикла изделий, которая использует комплексную оценку состояния материала и поверхности изделия на различных структурных уровнях.

В результате для прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин и управления их работоспособностью основополагающее значение имеет комплексная оценка их структурного состояния. Особенно это актуально при изготовлении деталей из материалов с гетерогенной структурой и, как следствие, с нестабильными свойствами. Примером таких материалов являются защитные покрытия [2, 3].

В общем случае для характеристики материалов необходимо учитывать как параметры их структуры и показатели механических свойств, так и химический состав. Изделия из материалов с близкими по значениям свойствами, но разных по химическому составу, будут отличаться по эксплуатационным показателям. В свою очередь химический состав материала определяется химическим составом исходных компонентов и особенностями технологий получения конечного продукта – применительно к порошковым покрытиям необходимо рассматривать химический состав исходных порошков и параметры технологий формирования покрытий [4, 5]. Для исследования структуры и особенностей механических свойств таких материалов перспективно применение метода мультифрактальной параметризации [6, 7, 8].

**Методика мультифрактального анализа структуры покрытий.** Исследовались покрытия из порошков на железной основе ФХ-1 и ФХ-2, которые напылялись на образцы из углеродистой стали с помощью газопламенной горелки по режиму для самофлюсующихся порошков. Напыленные покрытия, в свою очередь, оплавлялись по режиму, оптимальному для самофлюсующихся сплавов.

Химический состав и значения некоторых показателей механических свойств покрытий из порошков ФХ-1 и ФХ-2 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 –Химический состав покрытий

Порошок	Химический состав, %						
	Основа	C	Cr	Si	B	Mn	Ni
ФХ-1	Fe	1–3	20–26	1–4	0,5–2,0	1-4	-
ФХ-2		2–3	16–22	1–4	0,5–2,0	-	3 -6

Таблица 2 – Механические свойства покрытий

Порошок	Твердость, HRC	Средняя твердость, HRC	Микро-твердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Средняя микро-твердость, кгс/мм <sup>2</sup>	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
ФХ-1	64-66	65	1000–1280	1140	25,6
ФХ-2	59-61	60	360-780	570	30,1

В порошках наблюдается значительное количество частиц чешуйчатой формы, что связано с измельчением предварительно отсеянных крупных частиц и введением их в первичный порошок. Исследуемые порошки отличаются малой насыпной плотностью, что связано как с неправильной формой частиц, так и с их пористостью. Образование округлых полостей внутри частиц связано с усадочными процессами и является следствием высокой газонасыщенностью распыляемого материала.

Микроструктура порошков ФХ-1 и ФХ-2 представляет собой быстроохлажденный легированный железоуглеродистый сплав, состоящий из эвтектики и больших скоплений карбидных и карбоборидных включений.

Структура покрытия из порошка ФХ-1 состоит из первичных карбидов (1450 - 1650 кгс/мм<sup>2</sup>), эвтектики (880 кгс/мм<sup>2</sup>) и зерен твердого раствора (635 кгс/мм<sup>2</sup>). Отличительной особенностью структуры является ее неоднородность и неравномерность распределения карбидов. Наиболее крупные карбиды расположены ближе к поверхности покрытия и в процессе эксплуатации не только истираются, но и выкрашиваются из более мягкой основы, что сказывается на износостойкости покрытия в целом.

Структура покрытия из порошка ФХ-2, состоящая из эвтектики (750 кгс/мм<sup>2</sup>) и карбидной фазы (1430 -18550 кгс/мм<sup>2</sup>) более однородна. Карбиды распределены равномерно и благодаря своей сложной форме, лучше закреплены в матрице. Однако покрытие ФХ-2 обладает худшей износостойкостью по сравнению с ФХ-1, так как твердость покрытия ФХ-2 ниже на 5 HRC

Для определения мультифрактальных параметров структуры покрытий использовалась компьютерная программа MFRDrom [9]. Оценивались следующие мультифрактальные параметры:

$\Delta_q$  – степень упорядоченности и нарушения симметрии для общей конфигурации структуры в целом. Увеличение (по модулю)  $\Delta_q$  показывает, что в структуре имеет место большее количество периодических составляющих, система накачивается информацией (негэнтропией) и в ней возрастает степень нарушения симметрии;

$f_q$  – мера однородности структуры, показатель характера распределения единичных элементов структуры в евклидовом пространстве, охватывающем структуру. Чем больше  $f_q$ , тем структура более однородна для канонических вариантов спектров, и наоборот, для псевдоспектров.

Изучались элементы спектра размерностей Реньи  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_q$ , характеризующего распределение точек в исследуемой области пространства:

$D_0$  – размерность Хаусдорфа-Безиковича (фрактальная размерность), характеризующая однородность фрактального множества;

$D_1$  – информационная размерность, характеризующая скорость роста количества информации при  $q \rightarrow 0$ ;

$D_2$  – корреляционная размерность, характеризующая вероятность нахождения в одной и той же ячейке пространства двух точек множества;

$D_{-q}$  и  $D_q$  – экстремальные значения энтропий Реньи для данной структуры в случае плоских и объемных мультифрактальных множеств, при достижении которых фрактальные множества вырождаются.

**Химический состав, характеристики структуры и свойств покрытий.** Для установления зависимости между параметрами структуры покрытий и исходным химическим составом порошков использовались представления о статистическом весе атомов стабильных конфигураций (SVASK).

В соответствии с конфигурационной моделью вещества [10] в химических соединениях возможно существование двух электронных подсистем: коллективизированной и локализованной. При этом наиболее стабильными электронными конфигурациями являются те, у которых суммарные спиновые моменты при образовании химических соединений минимальны. К ним относятся квантовые состояния  $p^0$ ,  $d^0$ ,  $f^0$  – незаполненное;  $sp^3$ ,  $d^5$ ,  $f^7$ ,  $s^2$ ,  $s^2p^6$  – полузаполненное;  $d^{10}$ ,  $f^{14}$  – заполненное. В химических соединениях эти электронные конфигурации могут быть локализованными или около атомных остовов, или в направлениях химических связей между атомами.

Наиболее прочной химической связью должны отличаться незаполненные электронные конфигурации атомов, входящих в соединение. Коллективизированным электронам характерна большая потенциальная энергия в сравнении с локализованными. За счет этого увеличивается их химическая активность или реакции протекают в направлении образования соединений, которые, для данных условий, отличаются большим SVASK. Таким образом, величина SVASK может быть использована для количественного описания первой ветви материаловедческой триады «технология-структура-свойства».

В связи с отсутствием точных данных по фазовому составу, в качестве величины, количественно определяющей химический состав покрытий, рассчитаем SVASK материала, как суммарный для элементного состава исходных компонентов покрытия по выражению:

$$SVASK = \frac{\sum_1^i (K_i \cdot SVASK_i)}{100},$$

где  $K$  – процентное содержание  $i$ -го элемента;  $SVASK_i$  – величина SVASK  $i$ -го элемента. Данные для расчетов приняты по [10].

Для обеспечения работоспособности покрытий в эксплуатации большое значение имеет способность их структуры адаптироваться к внешнему нагружению. Под адаптацией в данном случае понимается способность структуры материала трансформироваться без какого-либо необратимого повреждения (разрушения).

Переход от обратимого повреждения материала изделия к необратимому представляет собой неравновесный фазовый переход, понимание механизма которого дает важную информацию о критическом структурном состоянии материала, в пределах которого структура способна адаптироваться к изменяющимся внешним условиям без утраты своей целостности.

**Эксплуатационные свойства и адаптация структуры покрытий.** Для условий достижения граничного состояния неорганическими фрактальными средами установлено, что связь между фрактальной размерностью  $D_f$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  для плоских фракталов определяется соотношением [11]:

$$D_f = 1 + \nu.$$

Если учесть, что адаптация структуры металлов и сплавов к внешнему воздействию связана с нарушением симметрии, реализующейся при различных механизмах деформации (рекристаллизации, квазиупругой, упруго-пластической, пластической и перколяции), то для мультифрактальных структур такое соотношение имеет вид:

$$D_q^C = 1 + \nu_{ef}^*,$$

где  $\nu_{эф}^*$  – критический эффективный коэффициент Пуассона, контролирующий переход от одного механизма адаптации к другому;  $D_q^C$  – пороговое значение  $D_q$ , соответствующее утрате стабильности адаптации структуры к внешнему воздействию при реализации данного механизма деформации. Поэтому при смене механизма деформации, контролирующего адаптацию структуры к внешнему воздействию при достижении максимальной степени симметрии, критическое значение степени упорядоченности  $|\Delta_q^C|$  определяется достижением критического значения эффективного коэффициента Пуассона  $\nu_{эф}^*$ . Самоподобный переход от одного контролирующего механизма деформации структуры к другому определяется принципом кумулятивной обратной связи, соответственно с которым конечное значение  $(\Delta_q^C)_{i+1}$  для предыдущего механизма адаптации является начальным для последующего.

Критическое значение  $D_q^C$  при  $|\Delta_q| = |\Delta_q^C|$  может быть использовано для расчета показателя  $Z_A$ , интегрально учитывающего запас способности структуры к адаптации для сохранения устойчивого развития системы и ее целостности на макроуровне.

Поскольку нарушение симметрии, обусловленное внешним влиянием, проявляется в виде специфических структур мультифракталов, очевидно, что мультифрактальная параметризация структур материалов, которые подвергаются разным видам воздействия, является прямым методом определения адаптивных свойств структуры. Концепция фрактальной симметрии структуры материалов и развитая на ее основе трактовка зарождения мультифрактала как результата нарушения симметрии позволяет использовать информацию о нарушении симметрии для анализа механизма адаптации фрактальной структуры к внешнему воздействию. С учетом этого установлена связь между критическим значением обобщенной размерности Реньи  $D_q^*$ , отвечающим вырождению мультифрактального множества при максимальном нарушении симметрии, и степенью упорядоченности структуры  $|\Delta_q|$  для этого состояния.

Вырождение мультифрактала при достижении максимального нарушения симметрии определяется условием:

$$D_q^* = (1 - |\Delta_q|/2)D_1 = A_m^{\max} \cdot D_1,$$

где  $D_1$  – граничное значение  $D_q$ , отвечающее зарождению мультифрактала при данном  $\Delta_q$ ,  $A_m^{\max} = 1 - |\Delta_q|/2$  – максимальное значение меры способности структуры к адаптации

$A_m$  с, которое достигается при  $D_q^*$ .

Карта адаптации структуры материала к внешнему воздействию в общем виде формируется из трех областей – адаптации, деградации и необратимой повреждаемости (разрушения). Область адаптации ограничена вертикальной линией при  $\Delta_q = 0$ , горизонтальной при  $D_q^* = 2$  и наклонной линией  $D_q^C$ , характеризующей переход от обратимой повреждаемости к необратимой.

Границе, отделяющей область адаптации от области деградации, отвечает отрезок вертикали при  $\Delta_q = 0,5$ , что соответствует аморфизации кристаллической структуры в локальных областях металлов и сплавов, подвергнутых деформации.

Запас способности структуры к адаптации  $Z_A$  к внешнему воздействию рассчитывается по формуле:

$$Z_A = D_q^* - D_q^C.$$

На рис. 1 построена карта адаптации структур к внешнему воздействию для покрытий. При размещении критических значений показателей способности структуры к адаптации в области упруго-пластической деформации (УП) структура покрытий находится в стабильном состоянии, а при выходе из нее или при приближении к линии, характеризующей переход от обратимой повреждаемости к необратимой, имеет место нарушение стабильности системы, сопровождающееся сменой механизма адаптации.

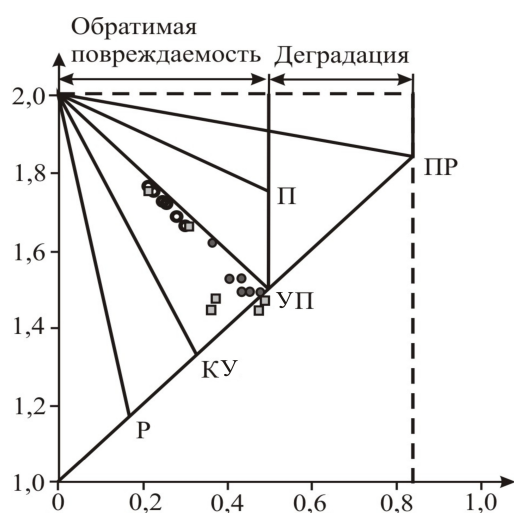


Рис. 1. Карта адаптации структур напыленных покрытий:

● – порошок ФХ-2; ■ – смесь порошков; ● – порошок ФХ-1.

Механизмы адаптации:

Р – рекристаллизация; КУ – квазиупругая деформация; УП – упруго-пластическая деформация; П – пластическая деформация;

ПР – перколяция

Карты адаптации структур покрытий к внешнему воздействию позволяют наглядно сравнить структуры покрытий в партии изделий, а также оценить структуры различных участков поверхности изделия друг от друга.

Анализ карты адаптации позволяет заключить, что минимальная разница в значениях меры запаса структуры к адаптации для образцов покрытия ФХ-1. При этом мера запаса структуры к адаптации для данного покрытия имеет наивысшее значение. Самая существенная разница в значениях меры запаса структуры к адаптации наблюдается для образцов покрытия ФХ-2. Следует отметить, что отдельные образцы покрытия обладают структурой, которая попадает в зону необратимой повреждаемости.

Анализируя результаты мультифрактальной параметризации

и критические показатели способности структуры покрытий к адаптации можно сказать, что для покрытий, для которых имеют место большие величины показателей механических свойств, в частности твердости, характерны наивысшие значения фрактальной размерности  $D_0$  и наименьшие значения показателей степени упорядоченности и меры однородности структуры, для них также характерна наибольшая способность адаптироваться к внешнему нагружению.

**Заклучение.** Таким образом, предложено технологические и эксплуатационные основы ресурсо- и энергосберегающих процессов обработки, упрочнения и восстановления изделий строить на методологии принятия проектных решений, которая использует комплексную оценку состояния материала и поверхности изделия на различных структурных уровнях. Применительно к износостойким покрытиям установлены связи исходных химических составляющих покрытий с мультифрактальными параметрами структуры, мультифрактальных параметров структуры покрытий с их твердостью, способности структуры покрытий адаптироваться к внешнему нагружению с мультифрактальными параметрами их структуры. Показатели мультифрактальной параметризации дают представления о текущем состоянии структуры материала и позволяют сравнивать между собой различные образцы покрытий или рассматривать неравномерность свойств покрытия на различных участках изделий. Совокупность мультифрактальных параметров структуры покрытий, отвечающих ее упруго-пластической деформации, характеризует стабильное состояние системы. Мультифрактальную параметризацию структур целесообразно использовать для оптимизации технологических процессов изготовления изделий с защитными покрытиями, работающих в заданных условиях эксплуатации.

*Исследования поддержаны белорусско-российским грантом БРФФИ-РФФИ по проекту Т16Р-176.*

**Список литературы:** 1. Автоматизация и управление в технологических комплексах/ А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец и др. Под общ. ред. А.М.Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 375 с. 2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В.И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С.А. Клименко.– Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с. 3. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др.– Мн. Беларус. навука, 1998. – 583 с. 4. Формирование наноструктур и фаз порошковых композиционных материалов / П.А.Витязь, А.Ф. Ильющенко, М.Л.Хейфец и др.// Сб. матер. Международных научных чтений им. чл.-кор. И. А. Одингга "Механические свойства современных конструкционных материалов". – Москва, 4–5 сент.2014 г. – Москва: ИМЕТ РАН, 2014. – С.105. 5. Фрактальный анализ структуры и эксплуатационные свойства газопламенных покрытий системы Ni-Cr-B-Si / С.А.Клименко, А.О.Нос, Ю.Э.Рыжов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия, 2014, №7. – С.11–17. 6. Структурообразование в металлах при интенсивных термических и комбинированных воздействиях / М.Л. Хейфец, В.И. Бородавко, А.Г. Колмаков и др.// Сб. матер. VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва, 10-13 ноября 2015 г. – М: ИМЕТ РАН, 2015. – С.324–326. 7. Мультифрактальный анализ структуры газопламенных покрытий серии ПГ-СР / С.А. Клименко, А.О. Нос, Ю.Э Рыжов и др.// Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 15-го Международного научно-технического семинара, 23-27 февр. 2015 г., г. Свалява, Карпаты: – Киев: АТМ Украины, 2015. – С. 75 – 77. 8. Оксагоев А. А. Мультифрактальный анализ нелинейной динамики адаптивности структуры материалов к внешним воздействиям // Прикладная синергетика – II: Сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – Т. 2. С. 7–14. 9. Клименко С.А., Мельничук Ю.О., Встовський Г.В. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля, 2009. – 170 с. 10. Самсонов Г. В., Прядко Л. Ф., Прядко И. Ф. Электронная локализация в твердом теле. – М.: Наука, 1976. – 315 с. 11. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов / В.Б Лазарев, А.С. Баланкин, А.Д. Изотов, А.А. Кожушко.– М.: Наука, 1993. – 176 с.