

УДК 548.3:669.018

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ СОСТОЯНИЙ
ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МОДУЛЯРНЫХ СТРУКТУР
С ФРАКТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ
В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Иванов В.В.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Новочеркасск, e-mail: valivanov11@mail.ru*

Обсуждаются возможные пространственные компоненты состояний детерминистических модулярных структур с фрактальной компонентой в композиционных материалах

Ключевые слова: структурное состояние, фрактальная компонента, фрактальная структура, композиционный материал

**SPACE STATES COMPONENTS OF THE DETERMINISTIC
MODULAR STRUCTURES WITH FRACTAL COMPONENT
INTO COMPOSITIONAL MATERIALS**

Ivanov V.V.

*South-Russian state polytechnic university (Novocherkassk polytechnic institute) by name of M.I. Platov,
Novocherkassk, e-mail: valivanov11@mail.ru*

The possible space states components of the deterministic modular structures with fractal component into compositional materials were discussed.

Keywords: structural state, fractal component, fractal structure, compositional material

В соответствии с концепцией синергизма свойств фаз твердой и смазочной компонент композиционных покрытий разработана модель, учитывающая влияние параметров химического и фазового состава, микроструктурных характеристик фаз твердой компоненты покрытия и особенностей конфигурации межфазных границ на трибологические свойства поверхности [1, 2]. В данной работе рассматриваются квазифрактальные 2D структуры как возможные аппроксиманты сайз-распределения ультрадисперсных частиц фаз и конфигураций межфазных границ на поверхности антифрикционных покрытий в процессе трибовоздействия со стороны контр-тела. Разработан алгоритм выбора и идентификации данных структур с необходимыми характеристиками (фрактальной размерностью D , лакунарными сайз- и сайт-распределениями и т.д.). Значения локальной и лакунарной размерностей каждой фрактальной структуры могут быть использованы при определении квазиупорядоченного сайт-распределения определенных фаз по поверхности и конфигурационных характеристик межфазных границ. На основе этих данных возможна оценка поверхностной доли твердого смазочного компонента и расчет трибологических свойств покрытия в соответствии с синергической моделью [1].

В каждой ячейке структурированного 3D пространства состояния детерминистических модулярных структур определяются возможными кристаллическими r , наноразмерными n и фрактальными f компонентами [3–13]. Возможные структурные состояния в 1D пространстве могут быть комбинаторно перечислены и представлены следующей квадратной матрицей A

$$A^{(1D)} = \begin{vmatrix} r & n_r & f_r \\ r_n & n & f_n \\ r_f & n_f & f \end{vmatrix} = \|a_{ij}\|.$$

С учетом всех структурно совместимых сочетаний из трех компонент основные классы вероятных структурных состояний, содержащие хотя бы одну фрактальную компоненту в 3D пространстве, будут следующими [3, 4]: 1) фрактальный ($f f f$), 2) фрактальный кристаллический ($f f r$), 3) наноразмерный фрактальный гибридный ($n f f$), 4) наноразмерный фрактальный кристаллический ($n f r$) и 6) кристаллический фрактальный ($r r f$).

Квадратная матрица возможных состояний $A = \|a_{ij}\|$ в 3D пространстве (т.е. при $d = 3$) содержит всего $N = 3^{2d} = 729$ ориентационно различимых состояний, из которых 109 – состояния, принадлежащие

шести указанным выше классам. Перечислим возможные структуры и их симметрию [14], охарактеризуем представителей этих видов состояний, соподчиненные (\in) и сопряженные им (*) состояния.

1. **Класс фрактальный гибридный (f f f)**, структуры $R_{\text{фф}}^3$ (симметрия пространственных G^3_3 , слоевых G^3_2 ленточных $G^3_{2,1}$, точечных слоевых $G^3_{2,0}$, точечных ленточных $G^3_{2,1,0}$, стержневых G^3_1 групп):

1) (f f f) – 3D фрактальная гибридная структура, (f f f)* = (f f f), (f f f) \in (n_f n_f n_f),

2) (f f f_r) – 3D фрактал из 1D детерминистических фракталов, (f f f_r)* = (f f r_f), (f f f_r) \in (n_f n_f n_r),

3) (f f f_n) – 3D фрактал из 1D фрактальных нанообъектов, (f f f_n)* = (f f n_f), (f f f_n) \in (n_f n_f n_n),

4) (f f f_r) – 3D фрактал из 2D детерминистических фракталов, (f f f_r)* = (f r_f r_f), (f f f_r) \in (n_f n_r n_r),

5) (f f_r f_n) – 3D фрактал из 1D детерминистических фракталов и из 1D фрактальных нанообъектов, (f f_r f_n)* = (f r_f n_f), (f f_r f_n) \in (n_f n_r n_n),

6) (f f_n f_n) – 3D фрактал из 2D фрактальных нанообъектов, (f f_n f_n)* = (f n_f n_f), (f f_n f_n) \in (n_f n_n n_n),

7) (f_r f_r f_r) – 3D детерминистический фрактал, (f_r f_r f_r)* = (r_f r_f r_f), (f_r f_r f_r) \in (n_r n_r n_r),

8) (f_r f_r f_n) – 3D фрактал из 2D детерминистических фракталов и 1D фрактальных нанообъектов, (f_r f_r f_n)* = (r_f r_f n_f), (f_r f_r f_n) \in (n_r n_r n_n),

9) (f_r f_n f_n) – 3D фрактал из 1D детерминистических фракталов и 2D фрактальных нанообъектов, (f_r f_n f_n)* = (r_f n_f n_f), (f_r f_n f_n) \in (n_r n_n n_n),

10) (f_n f_n f_n) – 3D фрактальный нанообъект, (f_n f_n f_n)* = (n_f n_f n_f), (f_n f_n f_n) \in (n_n n_n n_n).

2. **Класс кристаллический фрактальный гибридный (r f f)**, структуры $R_{\text{рфф}}^3$ (симметрия пространственных G^3_3 , слоевых G^3_2 , ленточных $G^3_{2,1}$):

1) (r f f) – 3D структура из упорядоченных 2D гибридных фракталов, (r f f)* = (r f f), (r f f) \in (n_r n_r n_r),

2) (r f f_r) – 3D структура из упорядоченных 2D детерминистических фракталов, (r f f_r)* = (r f r_f), (r f f_r) \in (n_r n_r n_r),

3) (r f f_n) – 3D структура из упорядоченных 2D фрактальных нанообъектов, (r f f_n)* = (r f n_f), (r f f_n) \in (n_r n_r n_n),

4) (r f_r f_r) – 3D структура из упорядоченных 2D детерминистических фракталов, (r f_r f_r)* = (r r_f r_f), (r f_r f_r) \in (n_r n_r n_r),

5) (r f_r f_n) – 3D структура из упорядоченных 1D детерминистических фракталов

и 1D фрактальных нанообъектов, (r f_r f_n)* = (r r_f n_f), (r f_r f_n) \in (n_r n_r n_n),

6) (r f_n f_n) – 3D структура из упорядоченных 2D фрактальных нанообъектов, (r f_n f_n)* = (r n_f n_f), (r f_n f_n) \in (n_r n_n n_n),

7) (r_n f f) – 3D структура из 2D гибридных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве нанофрагментов, (r_n f f)* = (n_r f f), (r_n f f) \in (n_n n_r n_r),

8) (r_n f f_r) – 3D структура из 2D детерминистических фракталов, упорядоченных в 1D пространстве нанофрагментов, (r_n f f_r)* = (n_r f r_f), (r_n f f_r) \in (n_n n_r n_r),

9) (r_n f f_n) – 3D структура из 2D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве нанофрагментов, (r_n f f_n)* = (n_r f n_f), (r_n f f_n) \in (n_n n_r n_n),

10) (r_n f_r f_r) – 3D структура из 2D детерминистического фрактала, упорядоченного в 1D пространстве, (r_n f_r f_r)* = (n_r r_f r_f), (r_n f_r f_r) \in (n_n n_r n_r),

11) (r_n f_r f_n) – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 1D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве, (r_n f_r f_n)* = (n_r r_f n_f), (r_n f_r f_n) \in (n_n n_r n_n),

12) (r_n f_n f_n) – 3D структура из 2D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве, (r_n f_n f_n)* = (n_r n_f n_f), (r_n f_n f_n) \in (n_n n_n n_n),

13) (r_f f f) – 3D структура из 2D гибридных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f f)* = (f_r f f), (r_f f f) \in (n_r n_r n_r),

14) (r_f f f_r) – 3D структура из 2D детерминистических фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f f_r)* = (f_r f r_f), (r_f f f_r) \in (n_r n_r n_r),

15) (r_f f f_n) – 3D структура из 2D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f f_n)* = (f_r f n_f), (r_f f f_n) \in (n_r n_r n_n),

16) (r_f f_r f_r) – 3D структура из 2D детерминистического фрактала, упорядоченного в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f_r f_r)* = (f_r r_f r_f), (r_f f_r f_r) \in (n_r n_r n_r),

17) (r_f f_r f_n) – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 1D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f_r f_n)* = (f_r r_f n_f), (r_f f_r f_n) \in (n_r n_r n_n),

18) (r_f f_n f_n) – 3D структура из 2D фрактальных нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, (r_f f_n f_n)* = (f_r n_f n_f), (r_f f_n f_n) \in (n_r n_n n_n).

3. **Класс наноразмерный фрактальный гибридный (n f f)**, структуры $R_{\text{нфф}}^3$ (симметрия пространственных G^3_3 , слоевых G^3_2 ленточных $G^3_{2,1}$, точечных слоевых $G^3_{2,0}$ групп):

1) $(n f f)$ – 3D наноструктура из 2D фрактальной гибридной структуры, $(n f f)^* = (n f f)$, $(n f f) \in (n n_f n_f)$,

2) $(n f f_r)$ – 3D наноструктура из 2D детерминистических фракталов, $(n f f_r)^* = (n f f_r)$, $(n f f_r) \in (n n_f n_r)$,

3) $(n f f_n)$ – 3D наноструктура фрактал из 2D фрактальных нанообъектов, $(n f f_n)^* = (n f f_n)$, $(n f f_n) \in (n n_f n_n)$,

4) $(n f_r f_r)$ – 3D наноструктура из 2D детерминистических фракталов, $(n f_r f_r)^* = (n f_r f_r)$, $(n f_r f_r) \in (n n_r n_r)$,

5) $(n f_r f_n)$ – 3D наноструктура из 1D детерминистических фракталов и из 1D фрактальных нанообъектов, $(n f_r f_n)^* = (n f_r f_n)$, $(n f_r f_n) \in (n n_r n_n)$,

6) $(n f_n f_n)$ – 3D наноструктура из 2D фрактальных нанообъектов, $(n f_n f_n)^* = (n f_n f_n)$, $(n f_n f_n) \in (n n_n n_n)$,

7) $(n_r f f)$ – 3D структура из 2D фрактальной гибридной структуры, $(n_r f f)^* = (r_n f f)$, $(n_r f f) \in (n_r n_f n_f)$,

8) $(n_r f f_r)$ – 3D наноструктура из 2D детерминистических фракталов, $(n_r f f_r)^* = (r_n f f_r)$, $(n_r f f_r) \in (n_r n_f n_r)$,

9) $(n_r f f_n)$ – 3D наноструктура из 2D фрактальных нанообъектов, $(n_r f f_n)^* = (r_n f f_n)$, $(n_r f f_n) \in (n_r n_f n_n)$,

10) $(n_r f_r f_r)$ – 3D наноструктура из 2D детерминистических фракталов, $(n_r f_r f_r)^* = (r_n f_r f_r)$, $(n_r f_r f_r) \in (n_r n_r n_r)$,

11) $(n_r f_r f_n)$ – 3D наноструктура из 1D детерминистических фракталов и 1D фрактальных нанообъектов, $(n_r f_r f_n)^* = (r_n f_r f_n)$, $(n_r f_r f_n) \in (n_r n_r n_n)$,

12) $(n_r f_n f_n)$ – 3D наноструктура из 2D фрактальных нанообъектов, $(n_r f_n f_n)^* = (r_n f_n f_n)$, $(n_r f_n f_n) \in (n_r n_n n_n)$,

13) $(n_f f f)$ – 3D нанофрактал из 2D гибридной фрактальной структуры, $(n_f f f)^* = (f_n f f)$, $(n_f f f) \in (n_f n_f n_f)$,

14) $(n_f f f_r)$ – 3D нанофрактал из 2D детерминистических фракталов, $(n_f f f_r)^* = (f_n f f_r)$, $(n_f f f_r) \in (n_f n_f n_r)$,

15) $(n_f f f_n)$ – 3D нанофрактал из 2D фрактальных нанообъектов, $(n_f f f_n)^* = (f_n f f_n)$, $(n_f f f_n) \in (n_f n_f n_n)$,

16) $(n_f f_r f_r)$ – 3D детерминистический нанофрактал из 2D детерминистических фракталов, $(n_f f_r f_r)^* = (f_n f_r f_r)$, $(n_f f_r f_r) \in (n_f n_r n_r)$,

17) $(n_f f_r f_n)$ – 3D нанофрактал из 1D детерминистических фракталов и из 1D фрактальных нанообъектов, $(n_f f_r f_n)^* = (f_n f_r f_n)$, $(n_f f_r f_n) \in (n_f n_r n_n)$,

18) $(n_f f_n f_n)$ – 3D нанофрактал из 2D фрактальных нанообъектов, $(n_f f_n f_n)^* = (f_n f_n f_n)$, $(n_f f_n f_n) \in (n_f n_n n_n)$.

4. **Класс наноразмерный фрактальный** $(n n f) = (n f n)$, структуры R_{nfn}^3 (симметрия пространственных G_3^3 , слоевых G_2^3 , стержневых G_1^3 групп):

1) $(n f n)$ – 3D структура из 2D нанообъектов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n f n)^* = (n f n)$, $(n f n) \in (n n_f n)$,

2) $(n f n_r)$ – 3D структура из 2D-нанофрагментов структуры, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n f n_r)^* = (n f n_r)$, $(n f n_r) \in (n n_f n_r)$,

3) $(n f n_f)$ – 3D структура из 2D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n f n_f)^* = (n f n_f)$, $(n f n_f) \in (n n_f n_f)$,

4) $(n f_n n)$ – 3D структура из 2D нанообъектов и 1D наноразмерных фракталов, $(n f_n n)^* = (n f_n n)$, $(n f_n n) \in (n n_n n)$,

5) $(n f_n n_r)$ – 3D структура из 2D-фрагментов структуры и 1D фрактальных нанообъектов, $(n f_n n_r)^* = (n f_n n_r)$, $(n f_n n_r) \in (n n_n n_r)$,

6) $(n f_n n_f)$ – 3D структура из 2D локальных фракталов и 1D фрактальных нанообъектов, $(n f_n n_f)^* = (n f_n n_f)$, $(n f_n n_f) \in (n n_n n_f)$,

7) $(n_r f_r n)$ – 3D структура из 2D-нанофрагментов структуры и 1D детерминистических фракталов, $(n_r f_r n)^* = (r_n f_r n)$, $(n_r f_r n) \in (n_r n_r n)$,

8) $(n_r f_r n_r)$ – 3D структура из 2D-нанофрагментов структуры и 1D детерминистических фракталов, $(n_r f_r n_r)^* = (r_n f_r n_r)$, $(n_r f_r n_r) \in (n_r n_r n_r)$,

9) $(n_r f_r n_f)$ – 3D структура из 2D детерминистических фракталов и 1D локальных фракталов, $(n_r f_r n_f)^* = (r_n f_r n_f)$, $(n_r f_r n_f) \in (n_r n_r n_f)$,

10) $(n_r f_n n)$ – 3D структура из 2D-нанофрагментов структуры, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n_r f_n n)^* = (r_n f_n n)$, $(n_r f_n n) \in (n_r n_n n)$,

11) $(n_r f_n n_r)$ – 3D структура из 2D детерминистических фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n_r f_n n_r)^* = (r_n f_n n_r)$, $(n_r f_n n_r) \in (n_r n_n n_r)$,

12) $(n_r f_n n_f)$ – 3D структура из 1D фрактальных нанообъектов и 2D-нанофрагментов структуры, $(n_r f_n n_f)^* = (r_n f_n n_f)$, $(n_r f_n n_f) \in (n_r n_n n_f)$,

13) $(n_r f_n n_n)$ – 3D структура из 1D фрактальных нанообъектов и 2D локальных фракталов, $(n_r f_n n_n)^* = (r_n f_n n_n)$, $(n_r f_n n_n) \in (n_r n_n n_n)$,

14) $(n_r f_r n_r)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 2D-нанофрагментов структуры, $(n_r f_r n_r)^* = (r_n f_r n_r)$, $(n_r f_r n_r) \in (n_r n_r n_r)$,

15) $(n_r f_r n_p)$ – 3D структура из 2D детерминистических фракталов и 1D локальных фракталов, $(n_r f_r n_p)^* = (r_n r_f f_n)$, $(n_r f_r n_p) \in (n_r n_r n_p)$,

16) $(n_f f_n n_p)$ – 3D структура из 2D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(n_f f_n n_p)^* = (f_n f_f f_n)$, $(n_f f_n n_p) \in (n_f n_f n_p)$,

17) $(n_r f_n n_p)$ – 3D структура из 1D фрактального нанобъекта и 2D локальных фракталов, $(n_r f_n n_p)^* = (f_n n_r f_n)$, $(n_r f_n n_p) \in (n_f n_r n_p)$,

18) $(n_r f_r n_p)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 2D локальных фракталов, $(n_r f_r n_p)^* = (f_n r_f f_n)$, $(n_r f_r n_p) \in (n_f n_r n_p)$.

5. **Класс кристаллический фрактальный наноразмерный (r f n)**, структуры R_{fn}^3 (симметрия пространственных G^3 , слоевых G^2 , ленточных G^2 , стержневых групп G^1):

1) $(r f n)$ – 3D фрактальная структура из упорядоченных нанобъектов, $(r f n)^* = (r f n)$, $(r f n) \in (n_r n_r n)$,

2) $(r f n_r)$ – 3D фрактал из упорядоченных 1D-наночастиц структуры, $(r f n_r)^* = (r f r_n)$, $(r f n_r) \in (n_r n_r n_r)$,

3) $(r f n_p)$ – 3D фрактал из упорядоченных 1D локальных фракталов, $(r f n_p)^* = (r f_n)$, $(r f n_p) \in (n_r n_r n_p)$,

4) $(r f_n n)$ – 3D фрактальный нанобъект из упорядоченных 1D наночастиц, $(r f_n n)^* = (r n_r n)$, $(r f_n n) \in (n_r n n)$,

5) $(r f_n n_r)$ – 3D фрактальный нанобъект из упорядоченных 1D-наночастиц структуры, $(r f_n n_r)^* = (r n_r r_n)$, $(r f_n n_r) \in (n_r n n_r)$,

6) $(r f_n n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из упорядоченных 1D локальных фракталов, $(r f_n n_p)^* = (r f_n n_p)$, $(r f_n n_p) \in (n_r n n_p)$,

7) $(r f_r n)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и упорядоченных наночастиц, $(r f_r n)^* = (r r_f n)$, $(r f_r n) \in (n_r n_r n)$,

8) $(r f_r n_r)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и упорядоченных 1D-наночастиц структуры, $(r f_r n_r)^* = (r r_f r_n)$, $(r f_r n_r) \in (n_r n_r n_r)$,

9) $(r f_r n_p)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и упорядоченных 1D локальных фракталов, $(r f_r n_p)^* = (r r_f f_n)$, $(r f_r n_p) \in (n_r n_r n_p)$,

10) $(r_n f_n)$ – 3D фрактальная структура из наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_n)^* = (n_r f_n)$, $(r_n f_n) \in (n n_r n)$,

11) $(r_n f_r n)$ – 3D фрактальная структура из 1D-наночастиц структуры, упорядоченных в 1D пространстве, $(r_n f_r n)^* = (n_r f_r n)$, $(r_n f_r n) \in (n n_r n)$,

12) $(r_n f_n n)$ – 3D фрактальная структура из 1D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_n n)^* = (n_r f_n n)$, $(r_n f_n n) \in (n n_r n)$,

13) $(r_n f_n n_r)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D наночастиц и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_n n_r)^* = (n_r n_r n_r)$, $(r_n f_n n_r) \in (n n n_r)$,

14) $(r_n f_n n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D-фрагментов структуры и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_n n_p)^* = (n_r n_r n_p)$, $(r_n f_n n_p) \in (n n n_p)$,

15) $(r_n f_r n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D локальных фракталов и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_r n_p)^* = (n_r f_r n_p)$, $(r_n f_r n_p) \in (n n n_p)$,

16) $(r_n f_r n_r)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов, наночастиц и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_r n_r)^* = (n_r r_f n_r)$, $(r_n f_r n_r) \in (n n_r n_r)$,

17) $(r_n f_r n_p)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов, фрагментов структуры и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_r n_p)^* = (n_r r_f n_p)$, $(r_n f_r n_p) \in (n n_r n_p)$,

18) $(r_n f_n n_p)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов, 1D локальных фракталов и упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n f_n n_p)^* = (n_r f_n n_p)$, $(r_n f_n n_p) \in (n n_r n_p)$,

19) $(r_f f_n)$ – 3D фрактальная структура из наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_n)^* = (f_r f_n)$, $(r_f f_n) \in (n_r n_r n)$,

20) $(r_f f_n n)$ – 3D фрактал из 1D-наночастиц структуры, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_n n)^* = (f_r f_n n)$, $(r_f f_n n) \in (n_f n_r n)$,

21) $(r_f f_n n_r)$ – 3D фрактал из 1D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_n n_r)^* = (f_r f_f n_r)$, $(r_f f_n n_r) \in (n_r n_r n_r)$,

22) $(r_f f_n n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_n n_p)^* = (f_r f_n n_p)$, $(r_f f_n n_p) \in (n_f n n_p)$,

23) $(r_f f_r n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D-наночастиц структуры, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_r n_p)^* = (f_r r_f n_p)$, $(r_f f_r n_p) \in (n_f n_r n_p)$,

24) $(r_f f_n n_p)$ – 3D фрактальный нанобъект из 1D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f f_n n_p)^* = (f_r f_n n_p)$, $(r_f f_n n_p) \in (n_f n_r n_p)$,

25) $(r_f f_r n)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и наночастиц,

упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f r_n)^* = (f_r r_n)$, $(r_f r_n) \in (n_f n_n)$,

26) $(r_f r_n)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 1D-наночастиц структуры, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f r_n)^* = (f_r r_n)$, $(r_f r_n) \in (n_f n_n)$,

27) $(r_f r_n)$ – 3D структура из 1D детерминистических фракталов и 1D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f r_n)^* = (f_r r_n)$, $(r_f r_n) \in (n_f n_n)$.

6. **Класс кристаллический фрактальный $(r r f)$** , структуры $R_{\text{тф}}$ ³ (симметрия пространственных G_3^3 , слоевых G_2^3 , ленточных $G_{2,1}^3$, или точечных слоевых групп $G_{2,0}^3$):

1) $(r r f)$ – 3D структура из упорядоченных в 2D пространстве 1D фракталов, $(r r f)^* = (r r f)$, $(r r f) \in (n_r n_f n_r)$,

2) $(r r f)$ – 3D структура из упорядоченных в 2D пространстве 1D детерминистических фракталов, $(r r f)^* = (r r f)$, $(r r f) \in (n_r n_f n_r)$,

3) $(r r f_n)$ – 3D структура из упорядоченных в 2D пространстве 1D фрактальных наночастиц, $(r r f_n)^* = (r r f_n)$, $(r r f_n) \in (n_r n_f n_n)$,

4) $(r r_n f)$ – 3D структура из слоев 1D фракталов и 1D наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_n f)^* = (r r_n f)$, $(r r_n f) \in (n_r n_n n_f)$,

5) $(r r_n f)$ – 3D структура из слоев 1D детерминистических фракталов и 1D наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_n f)^* = (r r_n f)$, $(r r_n f) \in (n_r n_n n_f)$,

6) $(r r_n f_n)$ – 3D структура из слоев 1D фрактальных наночастиц и 1D наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_n f_n)^* = (r r_n f_n)$, $(r r_n f_n) \in (n_r n_n n_n)$,

7) $(r r_f f)$ – 3D структура из 2D фракталов, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_f f)^* = (r r_f f)$, $(r r_f f) \in (n_r n_f n_f)$,

8) $(r r_f f)$ – 3D структура из 2D детерминистических фракталов, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_f f)^* = (r r_f f)$, $(r r_f f) \in (n_r n_f n_f)$,

9) $(r r_f f_n)$ – 3D структура из 2D фрактальных наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве, $(r r_f f_n)^* = (r r_f f_n)$, $(r r_f f_n) \in (n_r n_f n_n)$,

10) $(r_n r_n f)$ – 3D структура из 2D наночастиц, упорядоченных по фрактальному закону, $(r_n r_n f)^* = (n_r n_f n_f)$, $(r_n r_n f) \in (n n n_n)$,

11) $(r_n r_n f)$ – 3D структура из 2D наночастиц, упорядоченных по закону детерминистических фракталов, $(r_n r_n f)^* = (n_r n_f n_f)$, $(r_n r_n f) \in (n n n_n)$,

12) $(r_n r_n f_n)$ – 3D структура из 2D наночастиц, упорядоченных по закону фрактальных наночастиц, $(r_n r_n f_n)^* = (n_r n_f n_n)$, $(r_n r_n f_n) \in (n n n_n)$,

13) $(r_n r_f f)$ – 3D структура из 2D фракталов, упорядоченных в 1D пространстве наночастиц, $(r_n r_f f)^* = (n_r r_f f)$, $(r_n r_f f) \in (n n_f n_f)$,

14) $(r_n r_f f)$ – 3D структура из 2D детерминистических фракталов, упорядоченных в 1D пространстве наночастиц по фрактальному закону, $(r_n r_f f)^* = (n_r r_f f)$, $(r_n r_f f) \in (n n_f n_f)$,

15) $(r_n r_f f_n)$ – 3D структура из 2D фрактальных наночастиц, упорядоченных в 1D пространстве наночастиц по фрактальному закону, $(r_n r_f f_n)^* = (n_r r_f f_n)$, $(r_n r_f f_n) \in (n n_f n_n)$,

16) $(r_f r_f f)$ – 3D структура из 3D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по фрактальному закону, $(r_f r_f f)^* = (f_r r_f f)$, $(r_f r_f f) \in (n_f n_f n_f)$,

17) $(r_f r_f f)$ – 3D структура из 3D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по закону детерминистических фракталов, $(r_f r_f f)^* = (f_r r_f f)$, $(r_f r_f f) \in (n_f n_f n_f)$,

18) $(r_f r_f f_n)$ – 3D структура из 3D локальных фракталов, упорядоченных в 1D пространстве по закону фрактальных наночастиц, $(r_f r_f f_n)^* = (f_r r_f f_n)$, $(r_f r_f f_n) \in (n_f n_f n_n)$.

В работах [15–30] состояния поверхности композитов, обусловленные кристаллическими фазами, распределенными определенным образом наночастицами некоторых из этих фаз, а также квазифрактальными конфигурациями межфазных границ, в частности, состояния класса $(r r f)$, $(r f f)$, $(r n f)$, были использованы при интерпретации трибологических свойств поверхности композиционных материалов и покрытий на основе систем Ni-P и Ni-B.

Список литературы

1. Иванов В.В., Иванов А.В., Щербаков И.Н., Башкиров О.М. // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2005. – № 3. – С. 46–49.
2. Иванов В.В., Щербаков И.Н., Башкиров О.М., Логинов В.Т. // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2005. – № 4. – С. 42–44.
3. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7–1. – С. 26–28.
4. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7–1. – С. 28–30.
5. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7–1. – С. 26–28.
6. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7–1. – С. 30–31.
7. Иванов В.В. // Успехи соврем. естествознания, 2014. – № 4. – С. 105–108.
8. Иванов В.В. // Соврем. наукоёмкие технологии. – 2013. – № 5. – С. 29–31.
9. Иванов В.В. // Успехи соврем. естествознания. – 2013. – № 8. – С. 134–135.

10. Иванов В.В. // Успехи соврем. естествознания. – 2013. – № 8. – С. 129–130.
11. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7-1. – С. 33–35.
12. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 7-1. – С. 35–37.
13. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал. – 2013. – № 8-1. – С. 25–27.
14. Заморзаев А.М. Теория простой и кратной антисимметрии. Кишинев: Штиинца. – 1976. – 283 с.
15. Иванов В.В., Щербаков И.Н. Моделирование композиционных никель-фосфорных покрытий с антифрикционными свойствами. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2008. – 112 с.
16. Щербаков И.Н., Иванов В.В., Логинов В.Т. и др. Химическое наноконструирование композиционных материалов и покрытий с антифрикционными свойствами. Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки», 2011. – 132 с.
17. Иванов В.В., Арзуманова А.В., Иванов А.В., Балакай В.И. // Журн. прикладной химии. – 2006. – Т. 79. – Вып. 4. – С. 619–621.
18. Кукоз Ф.И., Балакай В.И., Иванов В.В. и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – Спецвыпуск. – 2007. – С. 94–99.
19. Кукоз Ф.И., Иванов В.В., Сметанкин Г.П., Балакай И.В. // Вестник ВЭЛНИИ, 2007. – Вып. 1 (53) – С. 92–97.
20. Кукоз Ф.И., Иванов В.В., Балакай В.И. и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2007. – № 5. – С. 56–58.
21. Кукоз Ф.И., Иванов В.В., Балакай В.И., Христофориди М.П. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2008. – № 4. – С. 123–128.
22. Иванов В.В., Курнакова Н.Ю., Арзуманова А.В., и др. // Журн. прикладной химии. – 2008. – Т. 81. – Вып. 12. – С. 2059–2061.
23. Балакай В.И., Иванов В.В., Сметанкин Г.П., Балакай И.В. // Вестник ВЭЛНИИ. – 2009. – Вып. 1 (57). – С. 32–41.
24. Иванов В.В., Арзуманова А.В., Балакай И.В., Балакай В.И. // Журн. прикладной химии. – 2009. – Т. 82. – Вып. 5. – С. 797–802.
25. Иванов В.В., Щербаков И.Н. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2011. – № 3. – С. 54–57.
26. Иванов В.В., Щербаков И.Н. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2011. – № 5. – С. 47–50.
27. Балакай В. И., Сметанкин Г.П., Иванов В.В., Мурзенко К.В. // Вестник ВЭЛНИИ. – 2013. – Вып. 2 (66). – С. 121–128.
28. Дерлугян П.Д., Иванов В.В., Иванова И.В. и др. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2013. – № 9. – С. 86–88.
29. Дерлугян П.Д., Иванов В.В., Иванова И.В. и др. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2013. – № 10. – С. 158–160.
30. Дерлугян П.Д., Иванов В.В., Иванова И.В. и др. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2013. – № 10. – С. 161–163.