

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин<sup>1</sup>, Е.Е.Власов<sup>1</sup>, А.А. Просолович<sup>2</sup>, А.С. Хвостиков<sup>2</sup>

## ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ НАНОСТРУКТУР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>,  
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет<sup>2</sup>

Изложена методология оценки фрактальной размерности наноструктурного состояния дислокационных структур и износостойких покрытий. Определена фрактальная размерность различных видов дислокационных структур и различных структур износостойких покрытий. Установлена связь фрактальной размерности с износостойкостью покрытий.

*Ключевые слова:* фрактальная размерность, износостойкие покрытия, дислокационные структуры.

В работах [1–3] показано, что при усталостных испытаниях ряда материалов на дислокационном уровне формируются наноструктуры – ячейки размером до 10 нм.

Наноструктуры представляют собой нанофрагменты дислокационных субструктур, возникающие под действием напряжений электронного ветра на общем фоне интенсивной механической нагрузки (~1ГПа). Решающим фактором измельчения нанофрагментов под действием электрического тока являются напряжения электронного ветра, что подтверждено количественными оценками на дислокационном уровне описания для предела выносливости - 25% (усталость) и степени сужения образца (проволоки) при волочении – 20%.

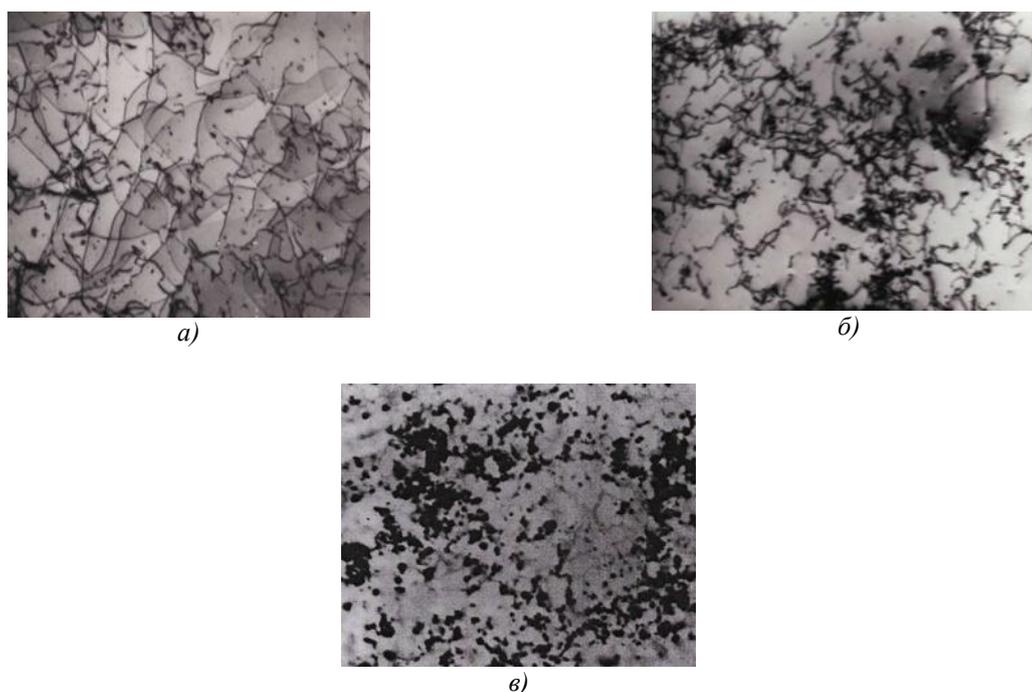
Таким образом, наноструктуры, сформированные из дислокаций и дислокационных субструктур под действием тока, подтверждают важность фактора подвижных дислокаций в задачах волочения и усталости [1].

При осаждении тугоплавких соединений из многоэлементных нитридов формируется наноструктурное состояние, что обеспечивает проявление покрытия и квантовых свойств – сверхпроводимости, высоких механических свойств, в частности, модуля упругости, модуля сдвига и т.д.

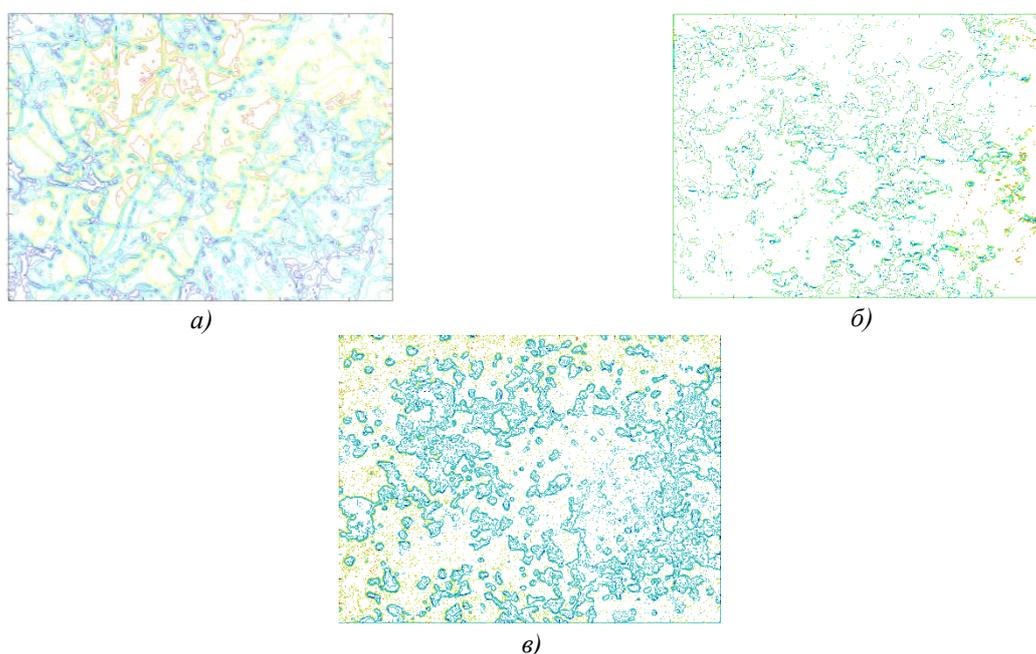
Методом оценки степени упорядоченности наноразмерных структур является фрактальная размерность [4], которая является характеристикой формы объектов и может быть вычислена различными экспериментальными методами. Процесс вычисления фрактальной размерности можно условно разбить на два этапа: этап получения экспериментальных и этап математической обработки данных.

Для вычисления фрактальной размерности был выбран клеточный метод. Вычисление фрактальной размерности заключается в следующем: цифровое изображение границ покрывалась сетками с квадратными ячейками. Для каждой сетки подсчитывалось количество квадратов, в которых находятся точки границ. Зависимость между числом квадратов и размеров сторон в двойных логарифмических координатах близка к линейной зависимости, угловой коэффициент  $k$  аппроксимирующей прямой (полученной линейной регрессией) соответствует фрактальной размерности. Вычисления проводились с помощью программы, составленной в ГОУ ВПО КнАГТУ. Для верификации работы программы производили расчеты фрактальной размерности кривой Коха и треугольника Серпинского, погрешность составила не более 0,1%.

При электронно-микроскопическом исследовании установлено, что при циклическом нагружении образование дислокаций сосредоточено вблизи границ ферритных зерен. Их формирование происходит уже на стадии микротекучести. По мере возрастания числа циклов нагружения в ферритных зернах на стадии деформационного упрочнения образуются хаотическая (рис. 1, а) и ячеистая дислокационные структуры (рис. 1, б), которые с ростом числа циклов нагружения переходит в фрагментированную (рис. 2, з), а затем в полосовую.



**Рис. 1. Электронные микрофотографии деформированных образцов из стали 20:**  
*а* - хаотическая дислокационная структура в ферритных зернах (x14000);  
*б* - ячеистая дислокационная структура на стадии деформационного упрочнения (x14000);  
*в* - фрагментированная дислокационная структура (x14000)



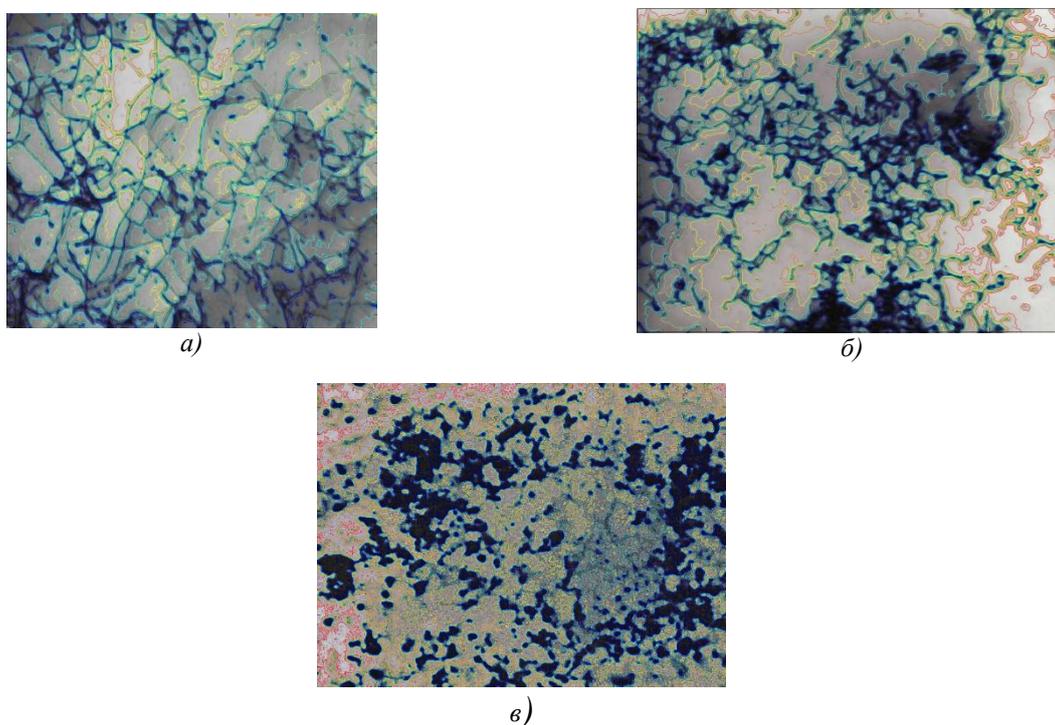
**Рис. 2 Кривые, огибающие максимы модуля вейвлет-спектра, характеризующие структурные изменения дислокационной структуры в деформированных объемах образцов из стали 20:**  
*а* - хаотическая дислокационная структура в ферритных зернах (x14000);  
*б* - ячеистая дислокационная структура на стадии деформационного упрочнения (x14000);  
*в* - фрагментированная дислокационная структура

Электронные микрофотографии для выявления границ разделения зерен были подвернуты двумерному вейвлет-анализу. После чего на плоскости строили кривую, огибающую максимум модуля вейвлет-спектр двумерного вейвлет-анализа (рис. 2). Проверка пра-

вильности определения структуры с помощью совмещения электронных микрофотографий деформированных образцов из стали 20 с кривыми, огибающими максимы модуля вейвлет-спектра (рис. 3), показала, что границы были определены правильно. После чего определялась фрактальная размерность кривых, огибающих максимы модуля вейвлет-спектра, характеризующие структурные изменения дислокационной структуры в деформированных объемах образцов из стали 20 поточным методом. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Проведенные исследования позволили идентифицировать предложенные критерии (фрактальная размерность) оценки структурного состояния деформированных материалов в виде электронно-микроскопических исследований структурных превращений, микро- и макроурушения материалов.

Рост фрактальной размерности свидетельствует о том, что в дефектной подсистеме происходит не только периодическая временная, но и периодическая пространственная организация (упорядоченность) структуры из-за роста степеней свободы.

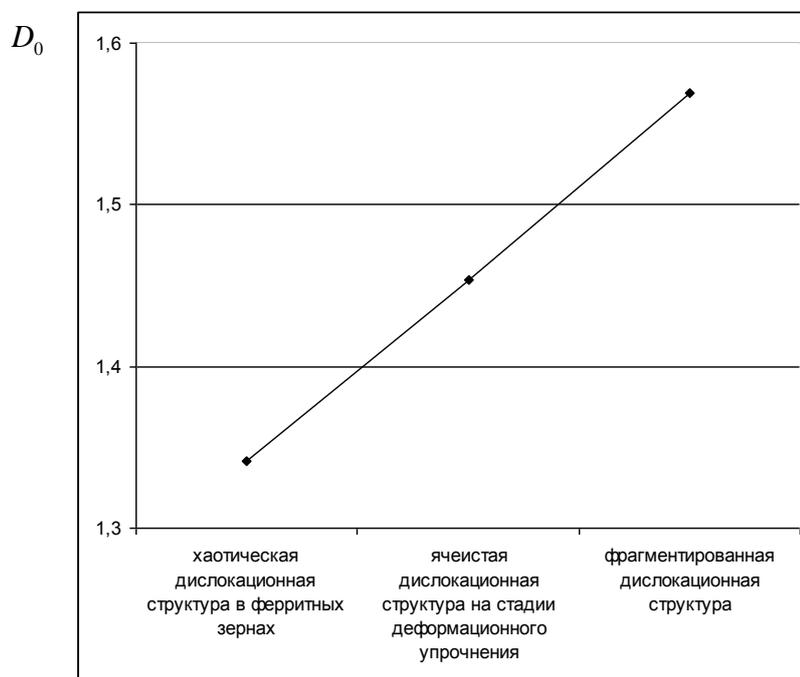


**Рис. 3. Электронные микрофотографии деформированных образцов из стали 20, совмещенные с кривыми, огибающими максимы модуля вейвлет-спектра:**  
*а* - хаотическая дислокационная структура в ферритных зернах (x14000);  
*б* - ячеистая дислокационная структура на стадии деформационного упрочнения (x14000);  
*в* - фрагментированная дислокационная структур

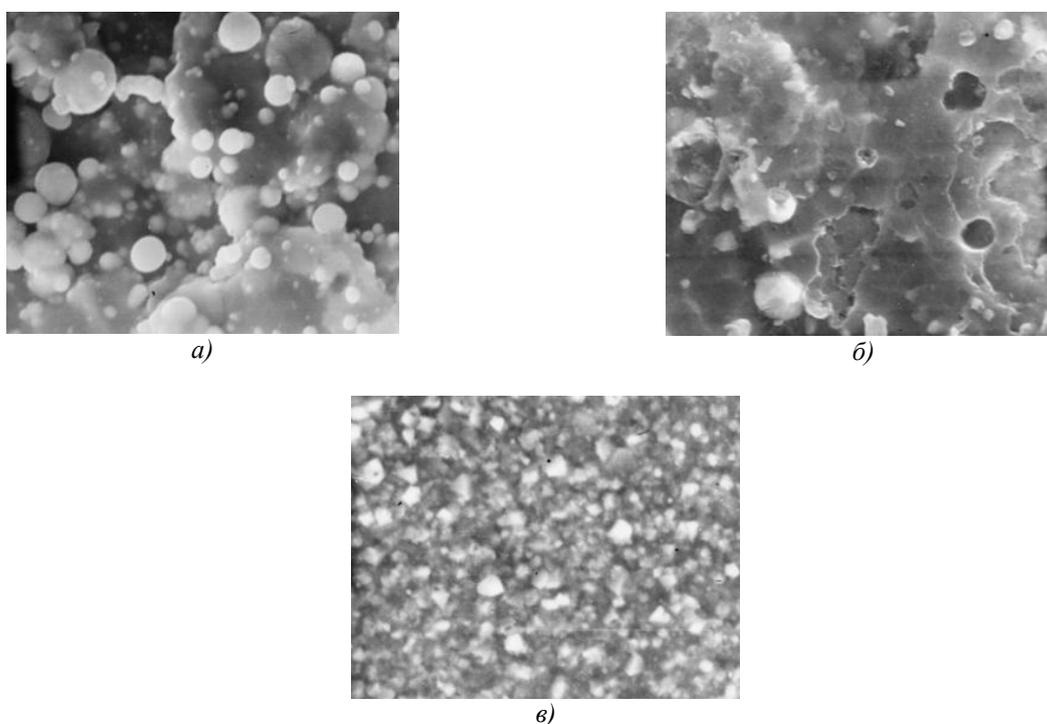
Анализ электронно-микроскопических исследований, фрактального и вейвлет-анализа при анализе электронных микрофотографии в процессе усталостных испытаний показывает, что эволюция дефектной структуры связана с накоплением энтропии с помощью диссипативных структур в циклически деформированных объемах. Это сопровождается установлением в дефектной подсистеме параметра порядка, который благодаря принципу подчинения выполняет роль информатора и контролирует структурные превращения от хаотической дислокационной структуры, образующейся при начальных циклах нагружения к ячеистой, далее – к фрагментированной и полосовой с последующим образованием микротрещин.

Среди активно развиваемых методов производства наноструктур ионно-имплантационная нанотехнология занимает особое место, поскольку в отличие от всех других методов, позволяет в любом материале формировать фазы выделений практически из

любых химических элементов. Высокодозная ионная имплантация является установившимся инструментом для синтеза в твердых телах наноструктур с целью модифицирования свойств материалов, что имеет бесконечное технологическое применение. В последнее время ведутся интенсивные исследования по применению ионной имплантации к решению проблем нанотехнологии.



**Рис. 4** Диаграмма фрактальной размерности кривых, огибающих максимы модуля вейвлет-спектра, характеризующие структурные изменения дислокационной структуры в деформированных объемах образцов из стали 20

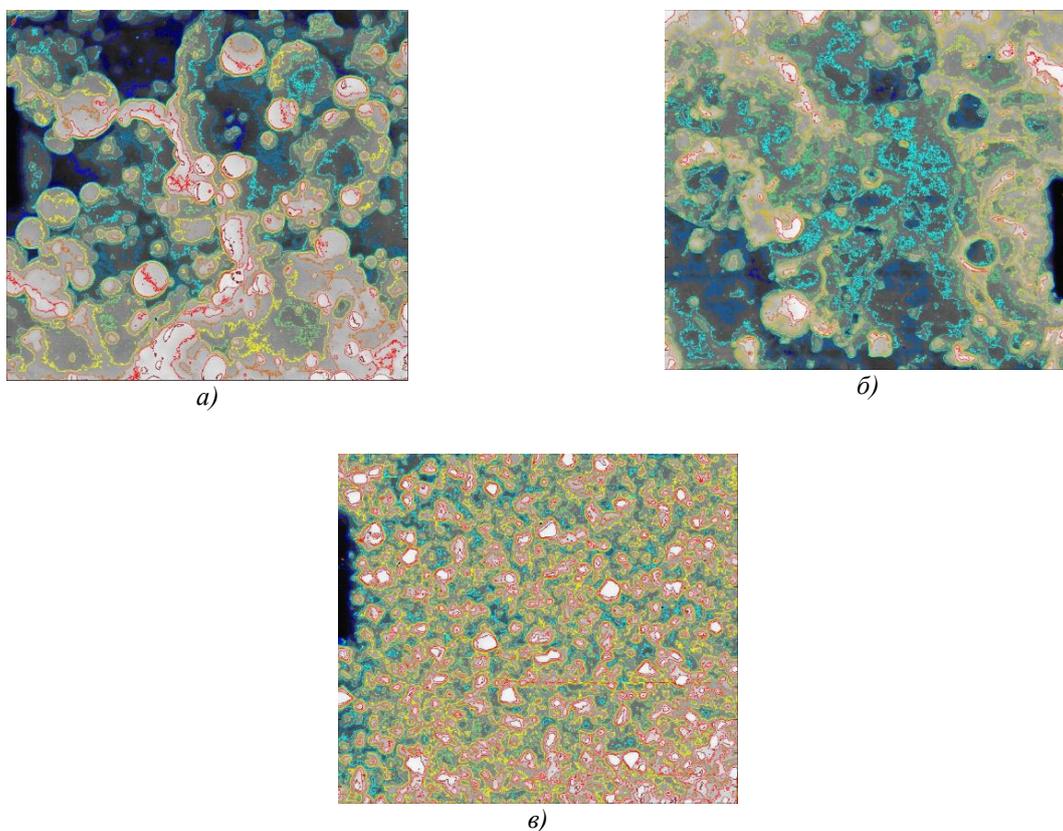


**Рис. 5.** Электронные микрофотографии поверхностной структуры покрытий:  
*а, б* - TiN (x5000); *в* - TiC+Ti(C-N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x5000)

При изготовлении инструмента с комплексом указанных свойств на поверхности и в объеме тела в настоящее время используют различного рода износостойкие покрытия (ИП). Повышение износостойкости инструмента путем использования ИП из нитридов титана и других тугоплавких элементов весьма перспективно. ИП характеризуются уникальной комбинацией свойств: высокой твердостью при повышенных температурах в зоне контакта, термической и химической устойчивостью и низкой термической проводимостью. Высокая износостойкость таких ИП достигается за счет измельчения зерна до манометрического уровня (размер зерна менее 100 нм) в процессе нанесения ИП на инструментальную основу с высокой плотностью дислокаций. В настоящей работе приведены результаты исследования износостойкости ИП влияния на эти процессы нанокристаллической дислокационной структуры ИП в условиях течения.

На рис. 5 показаны электронные микрофотографические фотографии поверхностной структуры покрытий TiN (рис. 5, а, б) и TiC +Ti(C-N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 5, в).

На рис. 6 показаны микрофотографии поверхностной структуры покрытий, совмещенные с кривыми, огибающими максимумы модуля вейвлет-спектра.



**Рис. 6 Электронные микрофотографии поверхностной структуры покрытий, совмещенные с кривыми, огибающими максимумы модуля вейвлет-спектра:**  
а, б - TiN (x5000); в - TiC+Ti(C-N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x5000)

Линии максимумов модуля вейвлет-спектра как бы рассекают поверхностную структуру в разных плоскостях и позволяют рассматривать структуру материала в объемном виде, что существенно увеличивает количество информации при изучении структуры материала.

На рис. 7 показана зависимость фрактальной размерности кривых, огибающих максимумы модуля вейвлет-спектра, от номера рисунка (рис. 5, а, в). Исследование фрактальной размерности кривых, огибающих максимумы модуля вейвлет спектра, позволяют предсказать свойства материала и сократить время на их исследования. Это позволит повысить производительность и эффективность научных исследований.

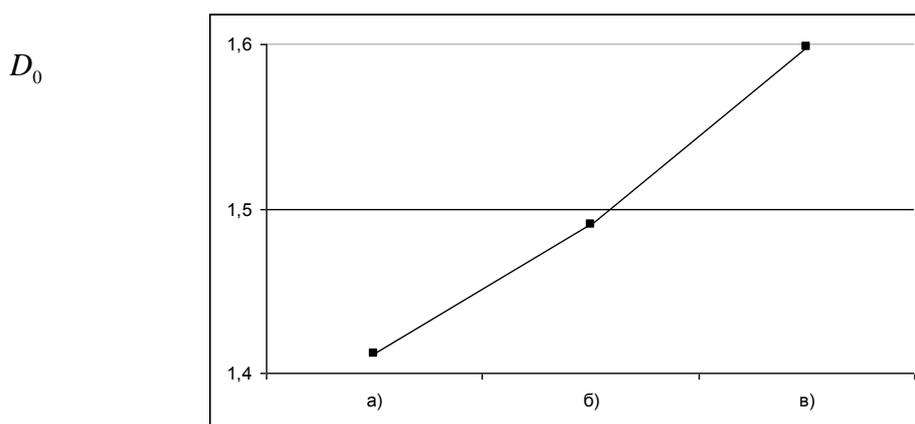


Рис. 7. Диаграмма фрактальной размерности кривых, огибающих максимы модуля вейвлет-спектра, от номера рисунка (рис. 5 а, в)

Исследование фрактальной размерности структур в зависимости от режимов их получения позволяет предсказать будущие свойства материалов и выявлять режимы обработки, когда свойства материалов наиболее оптимальны.

#### Библиографический список

1. Кабалдин, Ю. Г. Синергетика. Информационные модели самосборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии / Ю. Г. Кабалдин. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ. 2007. – 185 с.
2. Конева, Н.А. Накопление дефектов, запасенная упругая энергия и самоорганизация субструктуры / Н.А. Конева [и др.] // Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов: сб. Ленинград. 1987. С. 20–35.
3. Конева, Н.А. Дислокационные субструктуры и их трансформация при усталостном нагружении (обзор) / Н.А. Конева [и др.] // Известия вузов. Физика. 2002. № 3. С. 87–98.
4. Иванова В.С. Универсальность самоорганизации динамических структур живой и неживой природы // Синергетика. – М.: МГУ. 1999. № 2. С. 85–98.

Дата поступления  
в редакцию 01.02.2014

Y.G. Kabaldin<sup>1</sup>, E.E. Vlasov<sup>1</sup>, A.A. Prosolovich<sup>2</sup>, A.S. Hvostikov<sup>2</sup>

#### EVALUATION OF FRACTAL DIMENSION NANOSTRUCTURES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Komsomolsk-on-Amur state technical universitet<sup>2</sup>

**Purpose:** To develop methodology for assessing the fractal dimension of a nanocrystalline state systems different functional properties

**Methodology:** For calculating the fractal dimension has been selected "cell" method. Calculation of fractal dimension is as follows: digital image borders covered with a grid of square cells. For each grid counted the number of squares in which points are boundaries.

**Findings:** Results of research: an assessment of the fractal dimension of various wear-resistant coatings of refractory compounds.

*Key words:* fractal dimension, wear-resistant coatings, the dislocation structures.