

## Использование метода многопороговых сечений для анализа изображений микроструктуры поверхности

И.Н. Колупаев<sup>1</sup>, В.О. Соболев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ул. Политехническая, 29, 195251 Санкт-Петербург, Россия*

(Получено 19.10.2015; опубликовано online 10.12.2015)

Для количественной оценки развития физико-химических процессов на поверхности в работе апробирован метод анализа многопороговых сечений изображений поверхностного рельефа. Показано, что замена полнопрофильного анализа на анализ периодической системы сечений вдоль оси интенсивности позволяет сделать достаточно простым определение фрактальной размерности сложных рельефов поверхности, сформированных в неравновесных условиях.

Обсуждены проблемы компьютерного материаловедения сложных поверхностей и предложены пути их решения. Для процессов - травления стали с неметаллическими включениями, конденсации вакуумно-дуговых покрытий с капельной фазой, а также магнетронного осаждения в неравновесных условиях сильно-напряженных покрытий твердых растворов квазибинарных боридных систем установлена связь между особенностями структуры поверхности и ее фрактальной размерностью.

**Ключевые слова:** Многопороговые сечения, Компьютерная обработка, Фрактальная размерность, Неметаллические включения, Покрытия.

PACS numbers: 05.45.Df, 61.43.Nv, 81.05.Je, 81.15.Aa

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Функциональные свойства материала во многом определяются состоянием его поверхности. Отсюда такой большой интерес к различным методам модификации поверхности с целью ее структурной инженерии. Результатом такого воздействия для большинства методов является создание особого структурного состояния поверхности, как в результате модификации самой поверхности, так и путем нанесения на нее тонких пленок и покрытий с необходимыми свойствами.

Такие процессы проводятся в неравновесных условиях, а формируемое на поверхности структурное состояние относится к дробноразмерному.

Применение математического аппарата для анализа таких структур базируется, в частности, на их хаотичности, и в таком случае описываются на основе динамики хаоса [1]. Практическое применение элементов такого подхода осуществлено в работах по оценкам рельефа поверхностей трения, после электроэрозионной обработки, поверхности роста покрытий [2-8].

Вместе с тем, это означает, что для сопоставления полученных результатов с реальными параметрами материала и процессами на основе термодинамических представлений нужно признать хаотичность влияния на рельеф, например при изучении процесса травления, факторов, связанных как со свойствами материала (границы зерен и фаз), так и со свойствами среды травления (температура, состав, подвижность компонентов). Для покрытий при таком подходе хаотический характер должен быть вызван причиной, которая действует не только в ходе их формирования, но и при взаимодействии с агрессивной средой.

В результате, работы [1-8], связывающие компьютерную обработку с экспериментальными данными, добиваются практических рекомендаций на основе

корреляции фрактальной размерности со стандартными технологическими характеристиками: твердостью, коэффициентом трения, расходом материала, оптимизацией пористости покрытия и т. п., которые трудно назвать хаотичными.

Собственно, это и составляет цель прикладной науки – применение выводов теории к задачам практики. Однако по отношению к задачам материаловедения успешность применения описанного выше подхода связана с необходимостью согласованного решения ряда проблем:

**Влияние на достоверность результатов** объема и обоснованности математического аппарата (допущение о фрактальности и самоподобии) при материаловедческом исследовании. В этой связи использование строгой математической модели оправдано в ряде случаев вследствие того, что мультифрактальная размерность фрактально шероховатой поверхности [7] представляет собой количественную меру степени самоподобия неровностей различных размеров. Идеальные модели таких поверхностей получают интегрированием синусоидальных неровностей составляющих последовательность Фурье. Тогда для реальных шероховатых поверхностей мультифрактальная размерность может быть определена при помощи достаточно простого в реализации метода, предложенного Мандельбротом [9, 10]. Этот метод предполагает пересечение реальных (шероховатых) поверхностей горизонтальными плоскостями на задаваемых уровнях, в результате чего в каждой плоскости сечения появляются «острова». Эти «острова» обладают суммарной площадью  $A$  и общей протяженностью «береговой линии» или периметром  $L$ . График зависимости величины периметра  $L$  от значения площади  $A$  для множества уровневых сечений, построенный в логарифмических координатах (в идеальном случае) имеет вид прямой линии. Наклон этого графика к оси абсцисс  $a$  связан с фрактальной размерностью поверхности со-

отношением:  $\text{tg}(\alpha) = \Delta \ln(A)/\Delta \ln(L) = D/2 = (D - 1)/2$ , или  $D = 2\text{tg}(\alpha) + 1$ .

**Неоднозначность исходных данных** для обработки. Это связано с тем, что объектом мультифрактального анализа является рельеф, т.е. трехмерный массив (две пространственные координаты участка поверхности и данные об интенсивности параметра, который зависит от применяемой методики исследования поверхности: РЭМ, АСМ, профилограммы), где нормированные значения измеряемого параметра сопоставляются геометрической «высоте» рельефа, задаваемой при моделировании. При этом нельзя не учитывать специфику формирования изображения, включая эмиссионные свойства материала и параметры регистрации сигнала, дополнительно к реальной геометрии рельефа.

**Изображения, которые синтезируются «пиксельно»**, в исходном состоянии выглядят «сверх шероховатыми» в масштабе предельной разрешающей способности прибора. В этой связи нерешенной проблемой является алгоритм и критерии нахождения усредняющего фильтра, чтобы добиться совпадения с реальным видом, в то время как при анализе данные оптической микроскопии практически не нуждаются в такой фильтрации: напротив, применяются операции по увеличению резкости (контрастности).

Отмеченные проблемы в настоящее время не мешают науке о материалах выделить новое направление – фрактальное материаловедения, которое является базовым для количественного описания диссипативных структур, формирующихся в условиях, далеких от равновесия [11, 12].

Целью настоящего исследования является апробация методики обработки изображения поверхностного рельефа, которая давала бы количественную оценку по мере развития физико-химического процесса, начиная с плоской поверхности (будь то травление, осаждение покрытия и др.).

Для исследований были выбраны 3 характерных класса объектов по степени возрастания сложности процессов формирования рельефа:

1-й класс – это объекты, полученные с использованием методов воздействия переводящих исходную плоскую поверхность в трехмерную рельефную с закономерностями развития рельефа, связанными с режимами воздействия. Такое преобразование в работе достигается путем травления исходной плоской полированной поверхности стали с неметаллическими включениями.

2-й класс – это образование объемного рельефа на поверхности путем создания неоднородности по составу или структуре при формировании. В качестве образцов для отработки методики при исследованиях такого типа объектов в работе были выбраны нитридные покрытия с металлическими неупорядоченными включениями капельной фазы, полученные вакуумно-дуговым методом с высокой степенью ионизации.

3-й класс – это объекты с образованным на поверхности 3-х мерным периодическим (упорядоченным) рельефом вследствие самоорганизации. В работе для этого были использованы боридные покрытия с гофрированным рельефом поверхности, созданным под действием упорядочивающей самоорганизации при

релаксации структурных напряжений сжатия, развивающихся при получении покрытий ионно-плазменным распылением с относительно низкой степенью ионизации потока пленкообразующих частиц.

При этом в случае, например, рассмотрения процесса травления «активность» меняется с изменением строения материала (в обсуждаемых диапазонах: «макро-», «микро-», «нано-»), с диффузионными процессами в реактиве, со временем развития процесса и другими параметрами.

Для методов обработки поверхности высококонцентрированными пучками и нанесения покрытий, проводимых в сильно неравновесных условиях, использование развиваемой в работе методики оценки фрактальной шероховатости поверхности в зависимости от физико-технологических параметров процесса, позволит получить результаты, необходимые для прогнозирования стабильности и воспроизводимости формируемых структурных состояний и свойств.

## 2. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Рассматриваются два вида исходных данных:

– одни изображения получены при помощи программно моделирования. На них задается известная (с контролируемыми параметрами) функция распределения интенсивности по площади изображения. Они являются «тестовыми», хотя в известной мере моделируют и реальные процессы.

– другая часть изображений является результатом непосредственно металлографического исследования:

а) стали 15X11МФ с неметаллическими включениями после термической обработки, а также химического травления,

б) вакуумно-дуговые сверхтвердые (40-49 ГПа) покрытия нитридов высокоэнтропийных сплавов (TiZrHfVNBa)N, полученных при давлении азотной атмосферы  $P_N = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр и отрицательных постоянных потенциалах смещения ( $U_b$ ) – 200 В (1) и – 70 В (2) и при  $P_N = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Торр и  $U_b = -70$  В (3). Толщина покрытий 7-9 мкм.

в) ионно-плазменные покрытия диборида твердого раствора квазибинарной системы  $TiB_2-WB_2$  в состоянии распада [13, 14], толщиной 0,3-1,7 мкм, полученные магнетронным ионным распылением в атмосфере аргона.

Электронно-микроскопические исследования проводились с использованием растрового микроскопа Jeol JSM-840.

Обработка полученных для разных стадий процессов изображений осуществлялась по следующему алгоритму:

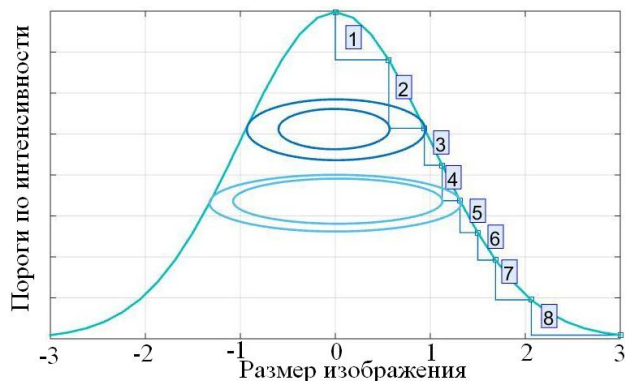
– проведение начальной (предварительной) обработки (монохроматизация, выравнивание контрастности, шумоподавление и т. п.). При этом предварительная обработка должна по возможности учитывать различие механизмов формирования контраста изображения, в частности взаимное расположение образца и коллектора вторичных электронов в случае использования данных растровой электронной микроскопии.

– применение перехода к серии бинарных изображений при помощи техники «мультипорговости» [15].

При этом количество уровней интенсивности и их взаимное расположение задаются заранее.

– формирование серии бинарных изображений, представляющих собой разницу между соседними уровнями (ступеньки) (рис. 1).

Авторская программа для обработки, написана на языке C++ в форме последовательной процедуры обработки с определением области интересов, порогов и расчета размерности Хаусдорфа с выводом данных в виде графических файлов.



**Рис. 1** – Схема формирования «ступенек интенсивности» на выбранном элементе изображения. 1...8 — количество уровней интенсивности при форматировании бинарных изображений

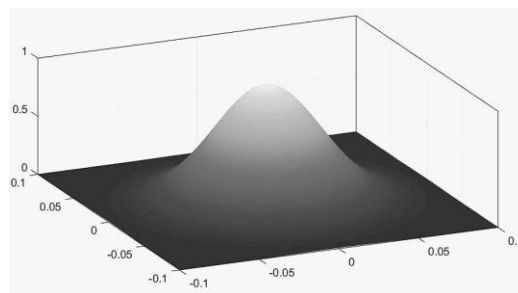
Каждая из «ступенек» представляет упрощенный для анализа по сравнению с «мульти-фрактальным хаосом» фрактальный объект. Применяется стандартная методика определения размерности Хаусдорфа (Хаусдорфа-Безиковича) для каждой ступеньки. Если использовать модель [7], которая сопоставляет интенсивность изображения с геометрической высотой рельефа, то представление зависимости размерности Хаусдорфа ступенек от порогов, является зависимостью этого параметра от геометрии рельефа. При этом шкала порогов, обозначаемая на рисунках, как величина порога, при построении зависимости градуируется от 0 до 1, где 1 – соответствует максимальной интенсивности изображения, т.е. как предполагается высоте рельефа, а пороги – дробными числами, соответствующим семи точкам сечения плоскостей в интервале шкалы интенсивности [0, 1].

Выбор «размера элемента изображения» непосредственно связан с параметром «увеличение» при металлографическом исследовании. Таким образом, осуществляется масштабирование при оценке применимости фрактального анализа.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для тестирования предлагаемой методики проводилась обработка модельных изображений в форме функции Гаусса (рис. 2а, б).

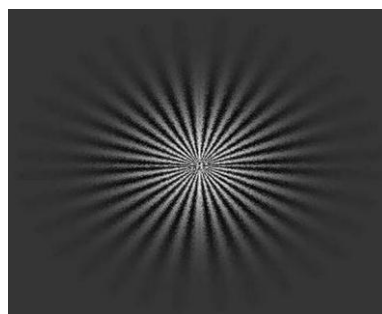
Для того, чтобы оценить влияние «развитости» элемента рельефа, тестовое изображение заведомо искажалось в большей или меньшей степени: в первом случае функция Гаусса искажалась гармоническим возмущением задаваемой частоты (рис. 2в); во втором к такому возмущению добавлялся случайный шум, зависящий от интенсивности изображения (рис. 2г).



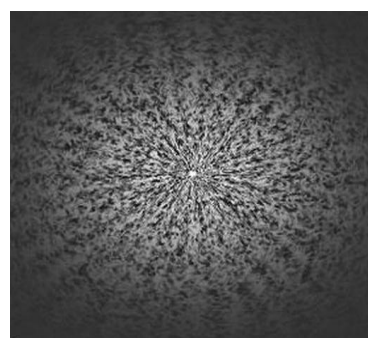
а



б



в



г

**Рис. 2** – Модельное изображение объемного (а) и плоскостного (б) представления функции Гаусса без возмущения, двумерного представления функции с периодическим возмущением (в), двумерного представления функции со случайным возмущением (г)

Из сопоставительного анализа полученных зависимостей для влияния различного возмущения рельефа по сравнению с исходным видно, что «развитость» поверхности выделенного элемента изображения увеличивает размерность Хаусдорфа на каждом из уровней (1...8) интенсивности (рис. 3).

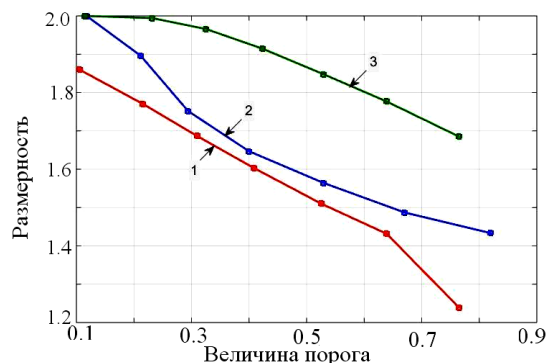


Рис. 3 – Влияние различного возмущения рельефа (рис. 2в и г) по сравнению с исходным распределением (рис. 2б) на пороговую размерность Хаусдорфа

Фактором, влияющим на достоверность описания рельефа при помощи методики мультипороговой оценки, являются инструментальные погрешности, к которым можно отнести расфокусировку изображения и недостаточную контрастность цифрового изображения. Их влияние на зависимость размерности Хаусдорфа от уровня порога также рассматривается в рамках предварительной аттестации предлагаемой методики. С этой целью изображение обрабатывалось усредняющим фильтром, в котором изменялась величина окна. При общем размере изображения ( $200 \times 200$  пикс) величина составляла ( $3 \times 3$  пикс), ( $13 \times 13$  пикс) и ( $23 \times 23$  пикс), рис. 4.

Результаты изменения размерности Хаусдорфа в зависимости от порога для всех 3-х случаев сведены на рисунке 4 г. Видно, что в этом случае «развитость» поверхности выделенного элемента изображения (рис. 4 а, б, в) уменьшает размерность Хаусдорфа на каждом из уровней интенсивности за счет «сглаживания» подробностей рельефа.

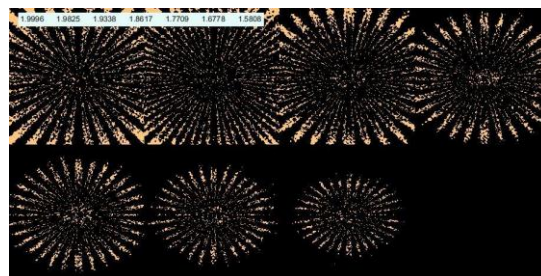
Из этого следует, что выводы относительно физических механизмов формирования рельефа, которые делаются на основании применения описанной методики, должны учитывать ограничение на масштаб характеристик рельефа, связанный с методом получения изображения.

Полученные таким образом наработки на модельных объектах были использованы при анализе поверхности после разных воздействий. Так для металлографического анализа поверхности шлифов после химической обработки были выбраны изображения травленной стали 15Х1МФ с неметаллическими включениями (рис. 5).

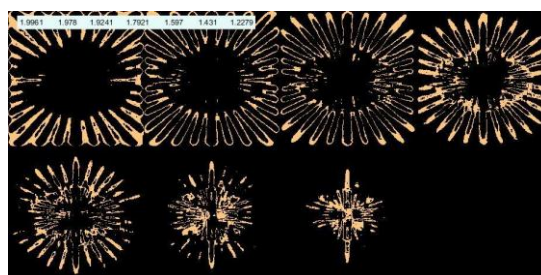
Из полученных при обработке результатов видно, что при пошаговом переходе от порогового сечения в плоскости основы (рис 5в, участок 1) до сечения максимума неметаллического включения (рис 5в, участок 7) происходит изменение размерности Хаусдорфа (фрактальной размерности) от величины, близкой к 2-м до 1,2. При этом излом на зависимости в интервале 1,9-1,4 (рис. 5г) определяет обработку на изображении сечений неметаллического включения и таким образом может служить критерием размерности выделения.

Как показал анализ полученных результатов важным фактором, который необходимо учитывать при сравнении полученной размерности, является используемое при этом увеличение (масштабирование).

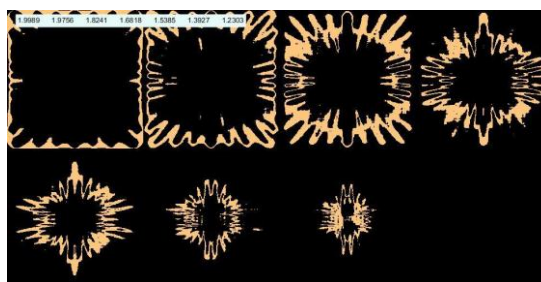
Из приведенного на рисунке 6 участка с неметаллическими включениями, снятого с 2-мя разными увеличениями методом растровой электронной микроскопии видно, что при меньшем увеличении происходит «размазывание» составляющих на снимке вследствие чего уменьшается размерность (рис. 6в).



а



б



в

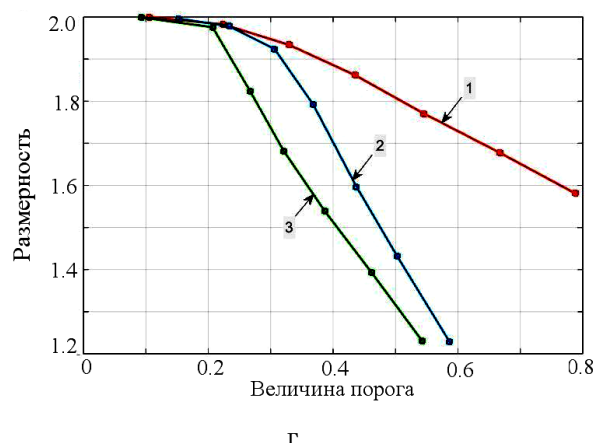
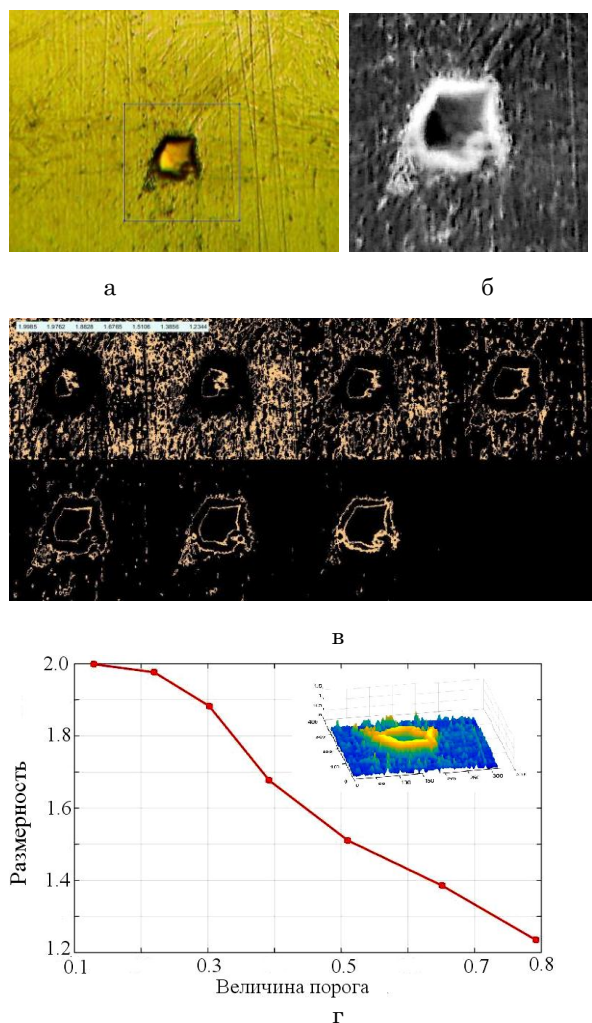


Рис. 4 – Вид выделенных ступенек для оценки фрактальной размерности модельного изображения в зависимости от расфокусировки: (а) усреднение  $3 \times 3$ , (б)  $13 \times 13$ , (в)  $23 \times 23$  и обобщенная зависимость пороговой размерности Хаусдорфа от расфокусировки (г): 1 – результаты обработки изображения 3в, 2 – результаты обработки изображения 3б, 3 – исходный рельеф сравнения (рис. 2в)



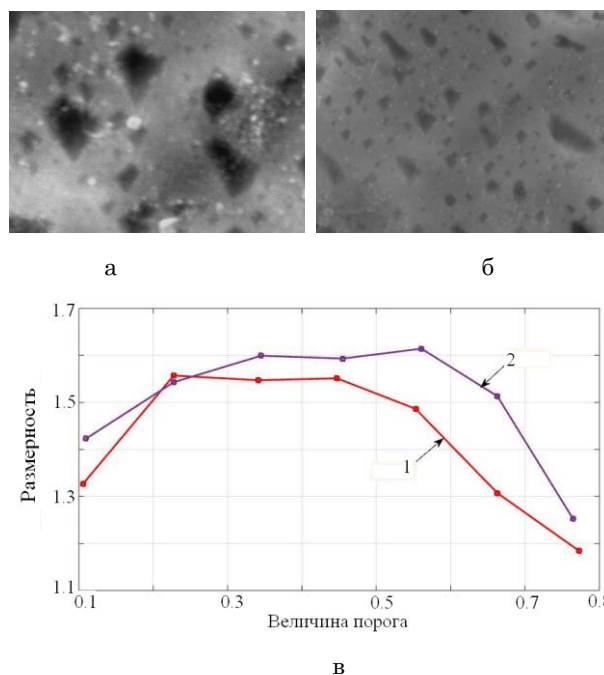


**Рис. 5** – Зависимость фрактальной размерности элемента изображения стали 15X1MФ с неметаллическими включениями: а – изображение поверхности шлифа, б – выделенный элемент изображения, в – выделенные ступеньки анализируемого объекта, г – размерность Хаусдорфа от порогов интенсивности с представленной (правый угол) схемой рельефа интенсивности выделенного элемента

Использованные стали с неметаллическими включениями при анализе многопороговой фрактальной размерности являются прообразом более сложных по условиям формирования систем – вакуумно-плазменных конденсатов с капельной фазой. В этом случае еще в большей мере масштабирование определяет адекватность полученных результатов реальному состоянию.

На рисунке 7 приведены растровые электронномикроскопические (РЭМ) снимки поверхности сверхтвердых (40-49 ГПа) покрытий нитридов высокоэнтропийных сплавов  $(\text{TiZrHfVNbTa})\text{N}$ , полученных методом вакуумного испарения с высокоэнергетичной бомбардировкой растущего покрытия (конденсация при ионной бомбардировке – КИБ [16]) при давлении азотной атмосферы  $P_N = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр и  $U_b = -200$  В (1) и  $-70$  В (2) и при  $P_N = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Торр и  $U_b = -70$  В (3)

Если сравнить влияние потенциала смещения при одинаковом давлении осаждения, то как видно повышение подаваемого при осаждении на подложку



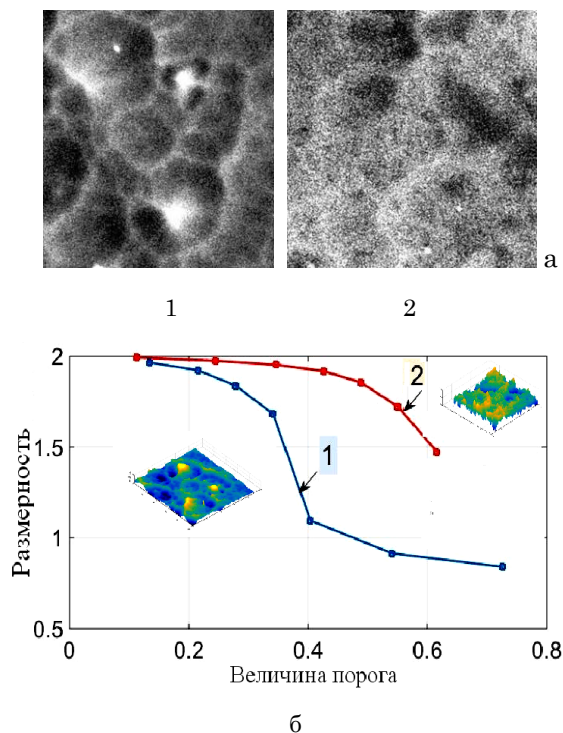
**Рис. 6** – Зависимость фрактальной размерности элемента изображения стали 15X1MФ после пассивации: а) элемент рельефа при увеличении  $\times 50000$ , б) тот же участок при увеличении  $\times 20000$ , в) сравнение характеристики рельефа (размерность Хаусдорфа) при разных инструментальных увеличениях: 1 –  $\times 20000$ , 2 –  $\times 50000$

отрицательного потенциала смещения от  $-70$  (серия 2 на рис. 7) до  $-200$  В (серия 1 на рис. 7) приводит к существенному увеличению ячеистой развитости рельефа поверхности и сопровождается ростом неоднородности пороговой зависимости размерности Хаусдорфа из-за большой амплитуды изменения по глубине и соответственно размера по оси интенсивности.

При этом следует отметить, что наличие участков капельной фазы, наиболее выраженных при низком потенциале смещения  $-70$  В (рис. 8), проявляется в виде излома размерной зависимости соответствующей фазовой границе. Таким образом, используя фиксированное увеличение, можно проводить автоматический анализ поверхностной неоднородности путем отслеживания формы кривой размерной зависимости Хаусдорфа, а по появлению изломов определять наличие и размерность капельной фазы. Делая при этом развертку по масштабу увеличения можно провести размерный анализ в автоматическом режиме с определением степени неоднородности материала по включениям.

Чувствительность кривой размерной зависимости Хаусдорфа к разномасштабным неоднородностям морфологии поверхности в наибольшей мере проявляется для покрытий, полученных при меньшем давлении  $P_N = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Торр [17], со значительно большим содержанием капельной фазы, что сказывается как на общем спектре, так и в особенности на выделенном фрагменте с капельной неоднородностью (рис. 8(2)).

Принципиальной особенностью второй группы покрытий – ионно-плазменных конденсатов диборида твердого раствора квазибинарной системы  $\text{TiB}_2\text{-WB}_2$ , толщиной  $0,3\text{-}1,7$  мкм, полученных магнетронным ионным распылением в атмосфере аргона, является



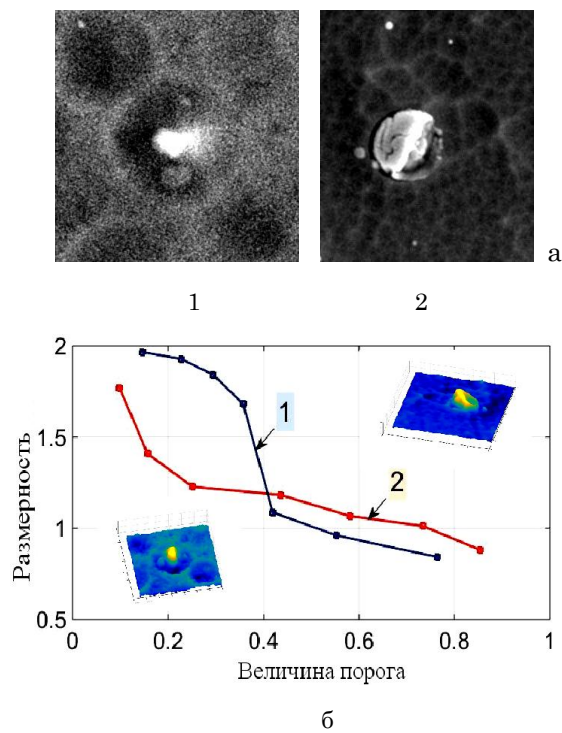
**Рис. 7** – Выделенные фрагменты поверхности (а) и зависимость фрактальной размерности с объемным представлением с учетом шкалы интенсивности (б) для покрытий (TiZrHfVNbTa)N, полученных при давлении азотной атмосферы  $P_N = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр и отрицательном постоянном потенциале смещения – 200 В (1) и – 70 В (2)

появление поверхностного рельефа из-за локального отслаивания покрытия от подложки. Это происходит вследствие сравнительно низкой ионизации в этом случае потока пленкообразующих частиц (до 5 % в сравнении с практически полной ионизацией потока при вакуумно-дуговом испарении) и как следствие относительно низкой адгезионной связи растущего покрытия с подложкой [18]. При этом, возникающие в процессе осаждения напряжения в системе «покрытие – подложка» из-за слабых физико-химических связей могут приводить к отслаиванию, в местах определяемых в соответствии с теорией перколяции при диссипации энергии деформации [19].

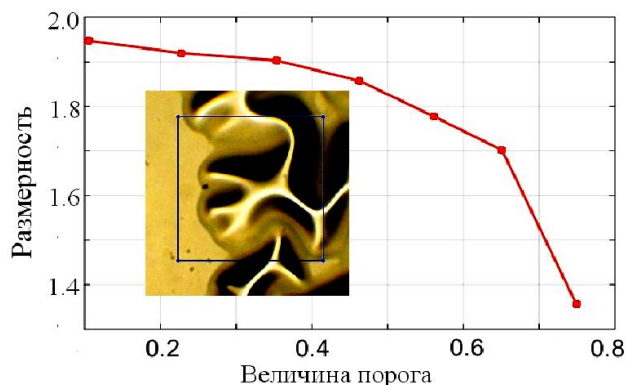
Формирование таких структур происходит после осаждения покрытия в вакуумной камере, уменьшения температуры от температуры осаждения (в исследуемых сериях 500 °С) до комнатной и разгерметизации установки. В случае действия сжимающих напряжений в плоскости роста покрытия это приводит к образованиям выпуклой формы (рис. 9).

В этом случае использование метода многопороговых сечений позволяет не только определить размерность неоднородности, но и оценить уровень напряженно-деформированного состояния, определяющий отрыв покрытия от подложки и образования в результате самоорганизационных процессов 3-х мерную деформированную структуру. Начальная стадия такой структуры приведена на рисунке 9, а 3-х уровневая по толщине структура на рисунке 10.

Видно, что при большей толщине 1,3 мкм (рис. 10, серия 1), как и для начальных стадий отслоения для наиболее толстых покрытий, толщиной



**Рис. 8** – Выделенные фрагменты поверхности (а) и зависимость фрактальной размерности с объемным представлением с учетом шкалы интенсивности (б) для покрытий (TiZrHfVNbTa)N, полученных при давлении азотной атмосферы  $P_N = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр (1) и  $P_N = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Торр (2).  $U_s = -70$  В

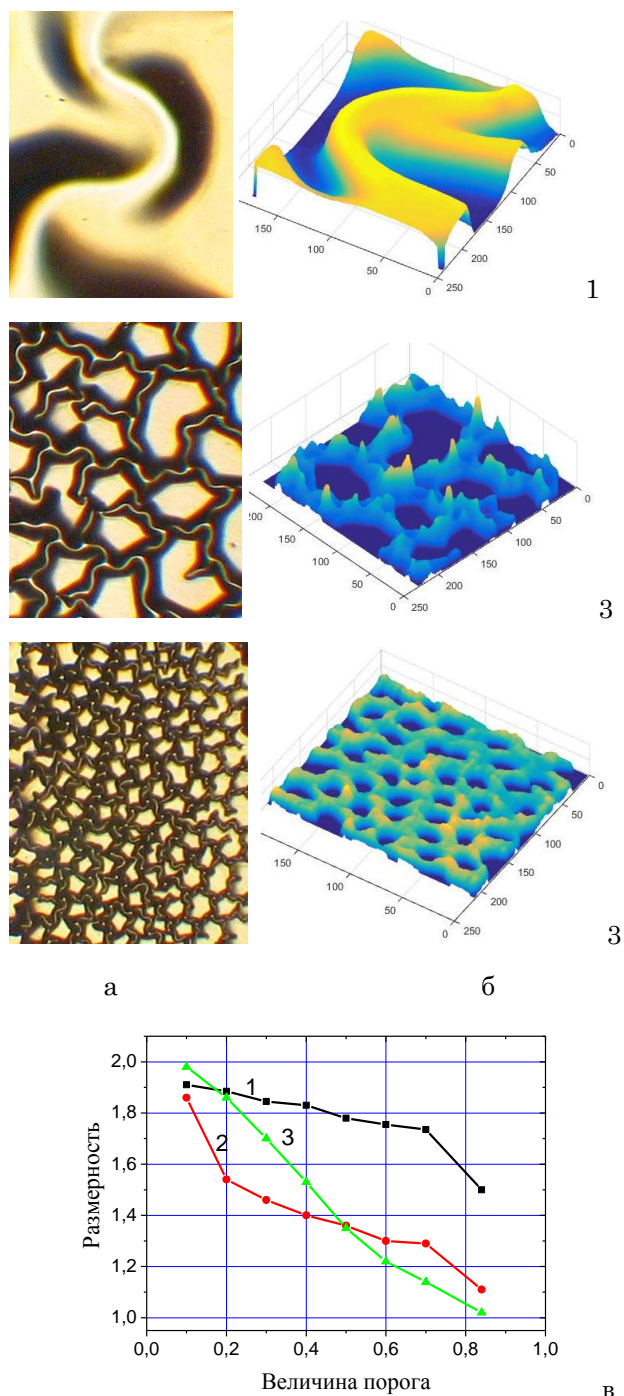


**Рис. 9** – Выделенный фрагмент начальной стадии образования поверхностных фрактальных структур вследствие отделения от подложки и вытеснения сжимающими напряжениями и зависимость его фрактальной размерности (покрытия квазибинарной системы TiB<sub>2</sub>-WB<sub>2</sub>, толщиной 1,7 мкм на подложке из полированного кремния)

1,7 мкм (рис. 9, вставка), характерно образование 3-х мерных структур с наибольшим размером ячеек (около 20 мкм) и наивысшей фрактальной размерностью по порогам (рис. 9, 10-1в).

Понижение толщины осаждаемого покрытия до 0,7 мкм (рис. 10, серия 2) приводит к уменьшению размера ячеек в среднем до 10 мкм, а при наименьшей толщине 0,3 мкм средний размер ячеек составляет около 3 мкм.

Как показано в [20, 21] в пределах тонкого поверхностного слоя (около 80 нм) концентрация напряжений вблизи границы раздела «покрытие-подложка» увеличивается при уменьшении толщины покрытия,



**Рис. 10** – Снимки выделенных фрагментов при увеличении  $\times 500$  (а), объемное представление с учетом шкалы интенсивности (б) и зависимость фрактальной размерности от порога (в) для покрытий квазибинарной системы  $TiB_2-WB_2$ , толщиной 1,3 мкм (1), 0,7 мкм (2) и 0,3 мкм (3)

т.е. по мере приближения данной границы к свободной поверхности образца. Таким образом, уменьшение размера ячеек при уменьшении толщины можно

связать с повышением уровня упруго напряженно-деформированного состояния развивающегося в покрытии.

Результаты поуровневого анализа фрактальной размерности показали (рис. 10в), что помимо общего изменения зависимости с ее характерным понижением при увеличении напряженно-деформированного состояния наиболее показательной является размерность наивысших порогов (0,6 и более), что, по сути, связано с радиусом закругления куполообразного рельефа, определяемого деформацией. Так в случае наименее деформированных толстых покрытий 1-й серии при пороге 0,6 размерность Хаусдорфа 1,77, для 2-й серии с большей деформацией размерность 1,3, а для наиболее тонких и деформированных покрытий третьей серии размерность составляет 1,2. Еще в большей степени это проявляется при пороге 0,8, составляя 1,57, 1,15 и 1,04, соответственно для 1-й, 2-й и 3-й серий (рис. 10, в).

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Метод мультипорогового анализа изображений, предложенный и примененный в настоящей работе, основан на оценке фрактальной размерности элементов рельефа, а не всей поверхности «в целом», что делает процедуру обработки эффективной на изображениях любого происхождения (данные не только оптической, но и растровой микроскопии).

2. Различия присущие реальным объектам (по сравнению с масштабной инвариантностью лежащей в основе используемого мультифрактального метода) при разном масштабе их исследований приводит к отличию фрактальной размерности реальных объектов при разном их увеличении. Поэтому для получения информации, необходимой для анализа структур и процессов, исходя из их фрактальных характеристик, необходимо проводить базовую (сравнительную) обработку изображений при нескольких увеличениях, выбранных в качестве стандартных.

3. Использование мультипороговой обработки при анализе влияния потенциала смещения на шероховатость поверхности вакуумно-дуговых покрытий показало, что с повышением  $U_b$  усиливается развитость поверхности, что сказывается на изменении фрактальной (Хаусдорфа) размерности. В наибольшей мере потеря планарности при изменении рельефа под действием ионной бомбардировки, приводящее к уменьшению фрактальной размерности при больших  $U_b$ , проявляется на больших порогах, т.е. для наиболее высоких точек рельефа.

4. В покрытиях, полученных магнетронным распылением, развитие рельефа, определяемое упорядоченным отделением под действием напряжений сжатия участков покрытия, может быть проанализировано мультипороговым методом с наибольшей выявляемостью эффекта на порогах близких к максимуму интенсивности.



## The use of Multithreshold Cross Sections for the Image Analysis of the Microstructure Surface

I.N. Kolupaev<sup>1</sup>, V.O. Sobol'<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., 61002 Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Saint-Petersburg State Polytechnical University, 29, Polytechnique Str., 195251 Saint-Petersburg, Russia

Method of the analysis of multithreshold cross-sectional images of the surface topography is tested for quantitative evaluation of physical and chemical processes on the surface. It is shown that the replacement of full-profile analysis by the analysis of the periodic system of sections along the axis of the intensity allows to make a fairly simple determination of the fractal dimension of complex surface topography formed under non-equilibrium conditions.

The problems of computer materials of complex surfaces and ways of solving them were discussed. For processes – pickling steel with non-metallic inclusions, condensation vacuum arc coating droplet phase, as well as magnetron sputtering under non-equilibrium conditions strongly strained surfaces of solid solutions quasi binary boride systems, the relations between the characteristics of the surface structure and its fractal dimension were established.

**Keywords:** Multithreshold section, Computer processing, Fractal dimension, Non-metallic inclusions, Coating.

## Використання методу низькопорогових перетинів для аналізу зображень мікроструктури поверхні

І.М. Колупаєв<sup>1</sup>, В.О. Соболю<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

<sup>2</sup> Санкт-Петербурзький державний політехнічний університет, ул. Політехнічна, 29, 195251 Санкт-Петербург, Росія

Для кількісної оцінки розвитку фізико-хімічних процесів на поверхні в роботі апробований метод аналізу багатопорогових перетинів зображень поверхневого рельєфу. Показано, що заміна повнопрофільного аналізу на аналіз періодичної системи перетинів уздовж осі інтенсивності дозволяє зробити досить простим визначення фрактальної розмірності складних рельєфів поверхні, сформованих в нерівноважних умовах.

Обговорено проблеми комп'ютерного матеріалознавства складних поверхонь та запропоновано шляхи їх вирішення. Для процесів - травлення сталі з неметалевими включеннями, конденсації вакуумно-дугових покриттів з крапельної фази, а також магнетронного осадження в нерівноважних умовах сильно-напружених покриттів твердих розчинів квазібінарних боридних систем встановлено зв'язок між особливостями структури поверхні і її фрактальної розмірності.

**Ключові слова:** Багатопороговий перетин, Комп'ютерна обробка, Фрактальна розмірність, Неметалеві включення, Покриття.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.А. Потапов, В.В. Булавін, В.А. Герман, О.Ф. Вячеславова, *Журнал технической физики* **75** № 5, 28 (2005) (А.А. Potapov, V.V. Bulavkin, V.A. German, O.F. Vyacheslavova, *Techn. Phys.* **50** № 5, 560 (2005)).
2. М.Ю. Сариллов, *Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта. Дис. на соиск. уч. ст. доктора технических наук* (Комсомольск-на-Амуре: 2008) (M.Yu. Starilov, *Povysheniye effektivnosti elektroerozionnoy obrabotki i kachestva obrabotannoy poverkhnosti na osnove podkhodov iskusstvennogo intellekta. Dis. na soisk. uch. st. doktora tekhnicheskikh nauk* (Komsomolsk-na-Amure: 2008)).
3. И.Н. Колупаев, В.О. Соболю, Е.Ю. Селиванова, *Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ-2015)»* **3**, 340 (СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та: 2015) (I.N. Kolupaev, V.O. Sobol', E.Yu. Selivanova, *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye metallicheskiye materialy i tekhnologii (SMMT-2015)»* **3**, 340 (SPb.: Izd-vo Politekhn. Un-ta: 2015)).
4. A.D. Pogrebnyak, V.N. Borisyuk, A.A. Bagdasaryan, O.V. Maksakova, Ye.V. Smirnova, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 4, 04018 (2014).
5. К.А. Стряпунина, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев, Д.М. Караваев, Е.В. Матюгулина, Л.Д. Сиротенко, *Известия Самарского научного центра Российской академии наук* **16** № 1(2), 552 (2014) (K.A. Stryapunina, L.Ye. Makarova, A.I. Degtyarev, D.M. Karavayev, Ye.V. Matyugulina, L.D. Sirotenko, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* **16** No 1(2), 552 (2014)).
6. О.С. Киселевский, В.П. Казаченко, *Трение и износ* **27** № 3, 304 (2006) (O.S. Kiselevskiy, V.P. Kozachenko, *Treniye i iznos* **27** No 3, 304 (2006)).
7. О.С. Киселевский, В.П. Казаченко, А.И. Егоров, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* № 2, 109 (2003) (S. Kiselevskiy, V.P. Kozachenko, A.I. Yegorov, *Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya* No 2, 109 (2003)).
8. W. Kwaśny, L.A. Dobrzański, M. Król, J. Mikula, *J. Achievement. Mater. Manufactur. Eng.* **24** No 2, 159 (2007).
9. Benoit B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature* (San Francisco: W.H. Freeman and co.: 1982).
10. Е. Федер, *Фракталы: пер. с англ.* (М: Мир: 1991) (Ye. Feder, *Fraktaly* (M: Mir: 1991)).



11. В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев, *Синергетика и фракталы в материаловедении* (М.: Наука: 1994) (V.S. Ivanova, A.S. Belkin, I.Zh. Bunin, A.A. Oksogoyev, *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* (M.: Nauka: 1994)).
12. В.С. Иванова, В.У. Новиков, *Нелинейный мир* 2 № 3, 197 (2004) (V.S. Ivanova, V.Yu. Novikov, *Nelineynyy mir* 2 No 3, 197 (2004)).
13. O.V. Sobol', *Phys. Solid State* 49 No 6, 1161 (2007).
14. O.V. Sobol', O.N. Grigoryev, Yu.A. Kunitsky, S.N. Dub, A.A. Podtelezchnikov, A.N. Stetsenko, *Sci. Sintering* 38 No 1, 63 (2006).
15. S.S. Al-amri, N.V. Kalyankar, S.D. Khamitkar, *J. Comput.* 2 No 5, 83 (2010).
16. O.V. Sobol', A.A. Andreev, S.N. Grigoriev, V.F. Gorban', M.A. Volosova, S.V. Aleshin, V.A. Stolbovoi, *Metal Sci. Heat Treatment* 54 No 3-4, 195 (2012).
17. И.И. Аксенов, Д.С. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, О.В. Соболев, *Вакуумно-дуговые покрытия. Технология, материалы, структура, свойства* (Харьков: НИЦ ХФТИ: 2015) (I.I. Aksenov, D.V. Aksenov, A.A. Andreyev, V.A. Belous, O.V. Sobol', *Vakuumno-dugovyye pokrytiya. Tekhnologiya, materialy, struktura, svoystva* (Kharkov: NNTs KhFTI: 2015)).
18. O.V. Sobol' *Phys. Solid State* 53 No 7, 1464 (2011).
19. Y.G. Wu, E.H. Cao, Z.S. Wang, *Appl. Phys. A* 76, 147 (2003).
20. Р.Р. Баллохонов, В.А. Романова, *Деформация и разрушение материалов* № 5, 12 (2007) (R.R. Balakhonov, V.A. Romanova, *Deformatsiya i razrusheniye materialov* No 5, 12 (2007)).
21. Р.Р. Баллохонов, В.А. Романова, *Физическая мезомеханика* 12 № 5, 45 (2009) (R.R. Balakhonov, V.A. Romanova, *Fizicheskaya mezomekhanika* 12 No 5, 45 (2009)).