Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тверской государственный университет»

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ, НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 6

ТВЕРЬ 2014

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379
Ф50

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики Тверского государственного технического университета
А.Н. Болотов

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики сегнето- и пьезоэлектриков Тверского государственного университета
Н.Н. Большакова

Редакционная коллегия:

Самсонов Владимир Михайлович – заведующий кафедрой теоретической физики ТвГУ, профессор, д.ф.-м.н. (ответственный редактор);
Созаев Виктор Адыгеевич – заведующий кафедрой физики факультета электронной техники Северо-Кавказского горно-металлургического института, профессор, д.ф.-м.н.;
Гафнер Юрий Яковлевич – заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Хакасского государственного университета, профессор, д.ф.-м.н.;
Сдобняков Николай Юрьевич – доцент, к.ф.-м.н. (зам. ответственного редактора, ответственный секретарь);
Базулев Анатолий Николаевич – доцент, к.ф.-м.н.;
Комаров Павел Вячеславович – доцент, д.ф.-м.н.;
Скопич Виктор Леонидович – доцент, к.ф.-м.н.;
Соколов Денис Николаевич – технический редактор.

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. – Вып. 6. – 484 с.

ISBN 978-5-7609-0971-8
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре теоретической физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379
ISBN 978-5-7609-0971-8
ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2014
© Тверской государственный университет, 2014

УДК 539.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НИТРИТА ТИТАНА, НАНЕСЁННОГО НА ПОДЛОЖКУ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Ю.В. Брылкин
Московский государственный университет Леса
141005, Московская область, Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, 1
maderator@yandex.ru

Аннотация: На основании снимков, полученных с использованием сканирующего туннельного микроскопа, показано, что фрактальная размерность может служить некоторой универсальной характеристикой поверхности нитрита титана, нанесенного на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.
Ключевые слова: *фрактал, сканирующая туннельная микроскопия, топология поверхности.*

Интерес к улучшению свойств поверхности изделий за счёт нанесения покрытия из нитрита титана (TiN) не ослабевает уже несколько десятилетий, из-за относительной дешевизны и безопасности в производстве. Технологии получения наноструктурированных покрытий на основе осаждения TiN на подложки из различных материалов, позволяющие в широких пределах целенаправленно модифицировать поверхностные свойства конструкционных и инструментальных материалов и достаточно просто применимые к уже готовым изделиями, описаны во многих работах.

Так, в [1] описаны методики проведения экспериментов с использованием ВЧ-плазмотрона. Характеристики полученного покрытия получались с использованием рентгено-фазового анализа (РФА), атомносиловой микроскопии и рамановской спектроскопии. В [2] рассмотрен ряд технологических приемов, обеспечивающих формирование нанопокрытий с различными физико-механическими свойствами, необходимыми для нанесения на режущий инструмент и способными решать широкий спектр производственных задач.

В данной работе проведено исследование структуры поверхности нитрита титана (см. рис. 1), полученного осаждением на подложку из нержавеющей стали в установке высокочастотного индукционного нагрева. В качестве исходного продукта используется порошок титана, подмешиваемый в струю плазмообразующего газа (аргона). После прохождения разрядной камеры, где струя плазмотрона приобретает температуру $\sim 10000K$, происходит осаждение паров исходных продуктов на поверхности. Так как плазменный поток получается безэлектродным способом, следовательно, отсутствуют паразитные примеси, то можно с

уверенностью говорить об исследовании синтезированного в чистой плазме соединения TiN .

Рис. 1. Фотография образца нитрита титана, нанесённого на подложку из нержавеющей стали.

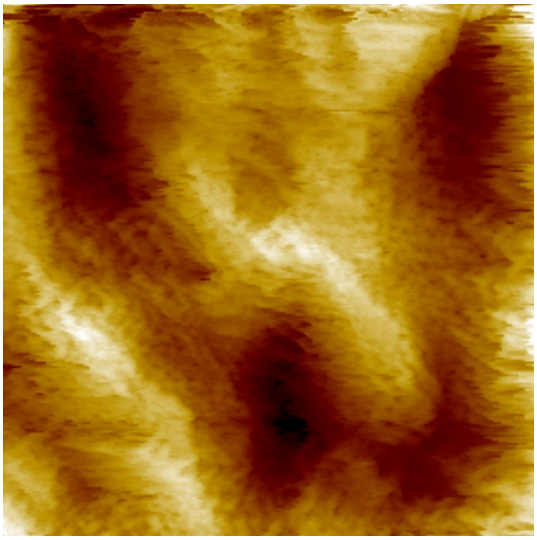
Поскольку для описания структуры поверхности не имеется единой методики, описывающей закономерности формирования структуры на чрезвычайно малых нанометровых уровнях съёмки, то использование теории фракталов представляется наиболее интересным.

Проведённые ранее исследования [3] показали реальную возможность описания фрактальными закономерностями топологии поверхности с достаточной для практических приложений точностью. Методика определения фрактальной размерности на основе данных сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) достаточно полно описана в работе [4].

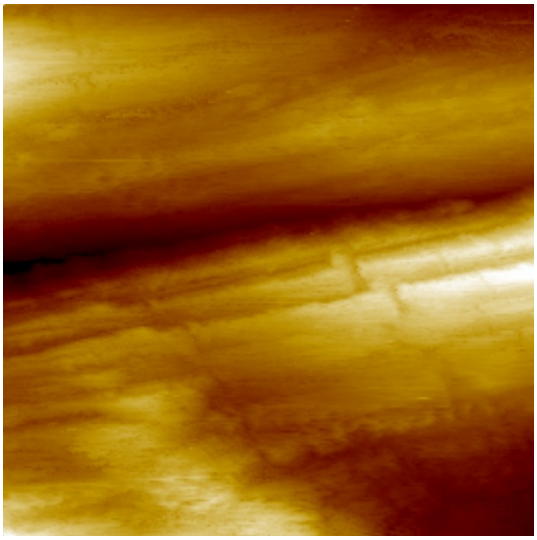
Для приведения в соответствие характеристик напылённого на подложку из нержавеющей стали нитрита титана были отобраны два эквивалентных участвующим в создании покрытия образца – сталь 12Х18Н10Т и сплав ВТ20 (см. рис. 2).

Поверхность исследуемого образца с нанесённым на подложку нитритом титана (см. рис. 3) визуально сильно развита, вследствие чего, традиционно применяемые в профилометрии параметры (шероховатость и прочие) не могут адекватно характеризовать поверхностную геометрию с такой тонкой структурой.

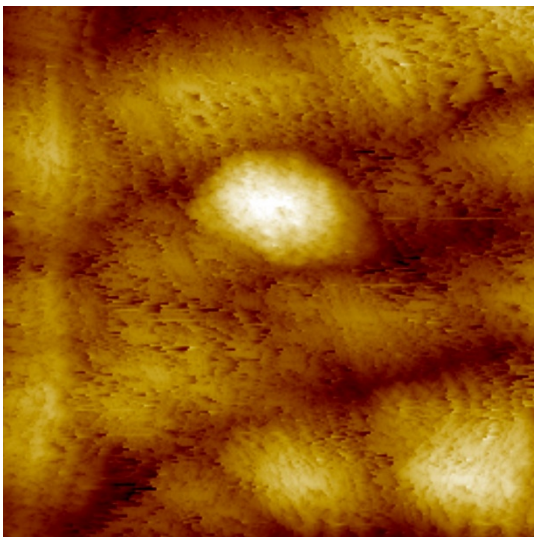
Новый подход, который мы использовали и развили при изучении таких рельефов, заключается в применении метода фрактального анализа, который осуществлялся путём цифровой обработки топограмм поверхностей. И хотя в материаловедении есть уже немало примеров применения этого метода, к изучению нитрита титана он применён впервые.



(а)

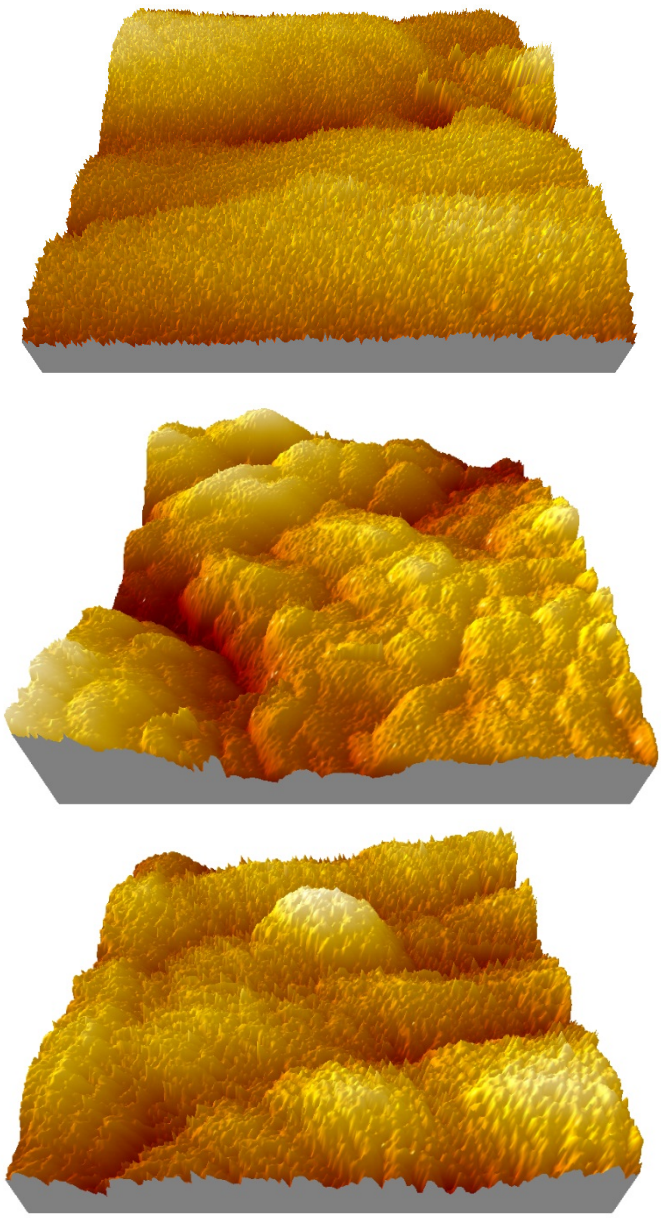


(б)



(в)

Рис. 2. Снимки поверхностей образцов, полученные с помощью СТМ: а) сталь 12Х18Н10Т, б) сплав ВТ20, в) *TiN* на нержавеющей стали.



(а)

(б)

(в)

Рис. 3. Объёмная визуализация снимков поверхности *TiN* на подложке из нержавеющей стали: а) 125×125 *нм*, б) 1×1 *мкм*, в) 4×4 *мкм*.

С одной стороны, фрактальная размерность есть показатель, характеризующий степень самоусложнения поверхности. В этом заключается её геометрический смысл. С другой стороны, геометрия поверхности определяется термодинамическими условиями и механизмами роста, и фрактальность становится его физической характеристикой.

Для снижения вероятности ошибки в расчёте фрактальной размерности был получен ряд снимков с различными размерами фрагментов поверхности: от 8×8 *мкм* до 125×125 *нм*. Результаты расчётов

фрактальных размерностей образцов с различными масштабами съёмки сведены в Таблицу 1.

На основе цифровой обработки и фрактального анализа топограмм, мы пришли к выводу, что фрактальность структуры нитрита титана, не является атомарно-гладкой, о чём свидетельствует профиль поверхности, представленный на рис. 4.

Таблица 1. Фрактальная размерность для различных масштабов съёмки

Фрагмент / Образец	125×125 *нм*	500×500 *нм*	2×2 *мкм*	4×4 *мкм*	8×8 *мкм*
Нержавейка	2,57	2,7	2,79	2,82	2,71
Титан	2,62	2,74	2,73	2,76	2,76
TiN на нержавейке	2,52	2,6	2,63	2,55	2,53

Это легко объяснить трехмерными механизмами формирования (большие тепловые потоки, низкая температура подложки и т.д.), генерирующими структуру с атомно-шероховатым рельефом.

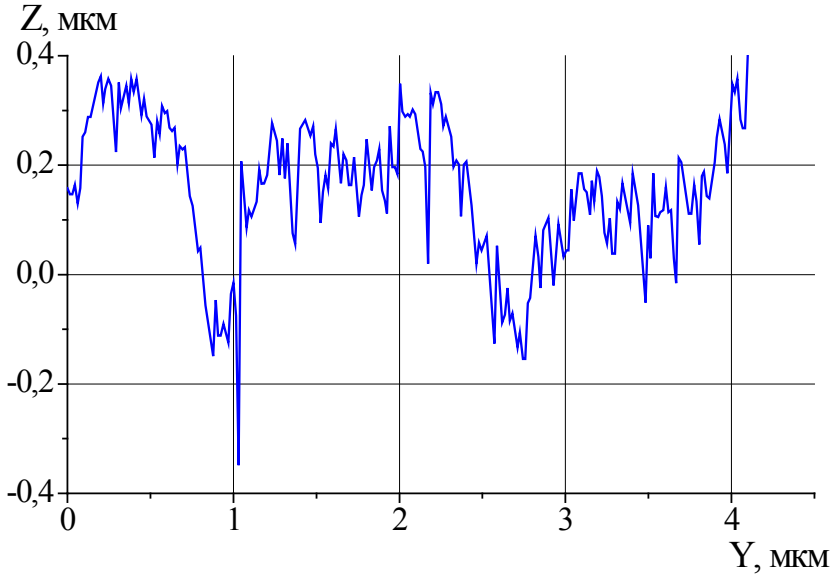


Рис. 4. Профиль поверхности *TiN* на подложке из нержавеющей стали.

Однако, постепенное наслоение частиц нитрита титана приводит к двумерным (сглаживающим рельеф) механизмам роста, благодаря которым фрактальная размерность поверхности нитрита титана несколько ниже ($D \sim 2,56$), чем фрактальная размерность стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ20, у которых, в среднем, фрактальная размерность $D \sim 2,72$. Это хорошо видно на рис. 5.

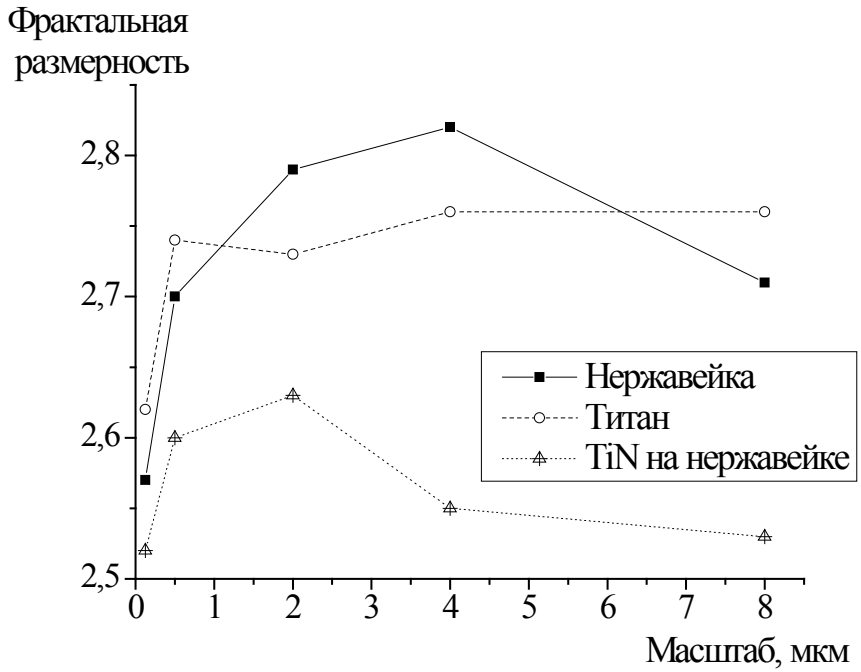


Рис. 5. Изменение фрактальных размерностей относительно масштаба съёмки.

Изменение топографии поверхности, а следовательно, снижение значения параметра D указывает на осаждение частиц на микродефектах поверхности. Так заполняются дефектные зоны, образованные при предшествующей механической обработке. Поэтому структура поверхности нитрита титана на микроуровнях развивается по абсолютно иным законам.

Топограммы поверхности продемонстрированные на рис. 2 б и рис. 2 в при внимательном рассмотрении обнаруживают два типа зёрен: мелкие (~50 *нм*) и крупные (~1 *мкм*), которые представляют собой сросшиеся мелкие зёрна.

Этот эффект, подтверждающий фрактальность структуры, можно объяснить попаданием частиц TiN на подложку в расплавленном состоянии, вследствие чего происходит теплоотвод вглубь, а кристаллизация происходит с созданием мелкозернистой структуры. С другой стороны, неравновесность среды, обусловленная конструктивным наличием завихрителя газового потока, приводит к укрупнению зёрен.

Надо отметить, что образование мелких зёрен подтверждает [5] повышение прочности и твёрдости, присущее покрытию из нитрита титана.

Таким образом, в настоящей работе успешно применены основные подходы фрактальной геометрии к определению основных параметров, характеризующих микроструктуру покрытия из нитрита титана. Полученные данные могут быть в дальнейшем использованы для задания

структуры поверхности при решении газодинамических задач и задач, связанных с тепломассопереносом.

Библиографический список:

1. **Залогин, Г.Н.** Получение наноструктурированных материалов и покрытий на высокочастотном индукционном плазмотроне / Г.Н. Залогин, М.И. Зимина, А.В. Красильников, Н.Ф. Рудин, Д.Д. Титов // Перспективные материалы. – 2011. – № 11. – С. 19-24.
2. **Волосова, М.А.** Исследование износостойкости концевых твердосплавных фрез с нанопокрытием / М.А. Волосова, А.Р. Маслов // Стружка. – 2012. – № 30. – С. 16-21.
3. **Брылкин, Ю.В.** Моделирование структуры рельефа реальных поверхностей на основе фракталов в аэродинамике разреженных газов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 3(76). – С. 22-28.
4. **Брылкин, Ю.В.** Соотношение фрактальной размерности и различной шероховатости для образцов меди / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Тверской государственный университет. – 2013. – Вып. 5. – С. 33-38.
5. **Катц, Н.В.** Металлизация распылением / Н.В. Катц, Е.В. Антошин, Д.Г. Вадивасов, Г.Д. Вольперт, Л.М. Камионский. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.