

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 5

ТВЕРЬ 2013

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 пьезо-
и сегнетоэлектриков 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, к.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, 2013. – Вып. 5. –
440 с.

ISBN 978-5-7609-0877-3

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 978-5-7609-0877-3

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2013

© Тверской государственной
университет, 2013

УДК 539.25

СООТНОШЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ И РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ МЕДИ

Ю.В. Брылкин¹, А.Л. Кусов²

¹Московский Государственный Университет Леса
141005, Московская область, Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, 1
maderator@yandex.ru

²Центральный Научно-Исследовательский Институт Машиностроения
141070, Московская область, Королёв, ул. Пионерская, 4
alkus@list.ru

Аннотация: Методом фрактального анализа на сканирующем туннельном микроскопе, получены микроструктурные характеристики поверхностей меди с различной шероховатостью.

Ключевые слова: фрактал, сканирующая туннельная микроскопия, топология поверхности.

Точная характеристика рельефа и шероховатости поверхности имеет первостепенное значение для многих отраслей машиностроения, так как некоторые функциональные свойства материала определяются структурой и характеристиками поверхности. Это особенно важно для поверхностей характеризующихся нерегулярностью микроструктуры. Среди методов диагностики топологии таких поверхностей видное место занимает сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) [1].

Преимуществом метода СТМ является то, что игла сканирующего туннельного микроскопа не контактирует с поверхностью во время измерения. В противном случае возможна деформация поверхности из-за высокого местного давления. Однако, в некоторых случаях, игла не может добраться до всех неровностей поверхности профиля, особенно если поверхность имеет острый профиль хребта с глубокими впадинами. Это приводит к сглаживанию рельефа поверхности и как следствие увеличивает погрешность расчёта фрактальной размерности.

Согласно ГОСТ 2789-73 шероховатость поверхности характеризуется величинами R_a и R_z . Высотный параметр R_z определяется как сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины является определением шероховатости:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}, \quad (1)$$

где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{vmi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля.

Параметр R_a определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2)$$

где l – базовая длина, n – число выбранных точек профиля на базовой длине, y_i – высота i -го наибольшего отклонения профиля от среднего значения.

ГОСТ 2789-73 учитывает свойства шероховатости поверхности независимо от способа её получения (литьё, прессование, прокатывание, обрубка, обработка резанием и т.п.) и распространяется на все виды материалов, кроме тех, при обработке которых получаются ворсистые поверхности (древесина, войлок, фетр и т.п.) [2]. Очевидно, что величин R_a или R_z недостаточно для полного описания топологии поверхности. Профили поверхностей материалов могут быть совершенно различными, но иметь сходные значения R_a или R_z . При обработке данных о поверхности учитываются лишь параметры шероховатости необходимые для количественной оценки неровностей поверхности, при этом оставляются без внимания её нерегулярность и сложность. Поэтому для описания геометрии поверхности была введена концепция фракталов. Эта концепция основана на самоподобии поверхности в разных масштабах. Её преимущество состоит в том, что структура поверхности характеризуется одним показателем - фрактальной размерностью D , которая находится в диапазоне $2 < D < 3$. Гладкая поверхность имеет значение $D=2$, а большее значение D характеризует увеличение шероховатости поверхности [3]. Фрактальная размерность предоставляет информацию о степени сложности топологии поверхностей и может быть связана с различными параметрами шероховатости поверхности.

Таким образом, фрактальная размерность является полезной характеристикой материалов. Кроме того, фрактальная размерность не зависит от разрешения прибора, с помощью которого получена топология поверхности.

Измерения и фрактальный анализ были выполнены на образцах медного сплава М1 ГОСТ 495-77. Каждый образец был подвергнут различной механической обработке. Фотографии поверхностей образца А, образца Б, и образца В, при десятикратном увеличении, сделанные с использованием микроскопа Levenhuk 3L представлены на рис. 1 соответственно.

Микрофотографии, использованные в этом исследовании, были сделаны на нанотехнологическом комплексе УМКА-02-Е, на базе сканирующего туннельного микроскопа.

Чтобы обеспечить эквивалентность площадей исследуемых образцов и снизить погрешность расчётов, были сняты фрагменты поверхностей, размером 4×4 мкм (см. рис. 2).

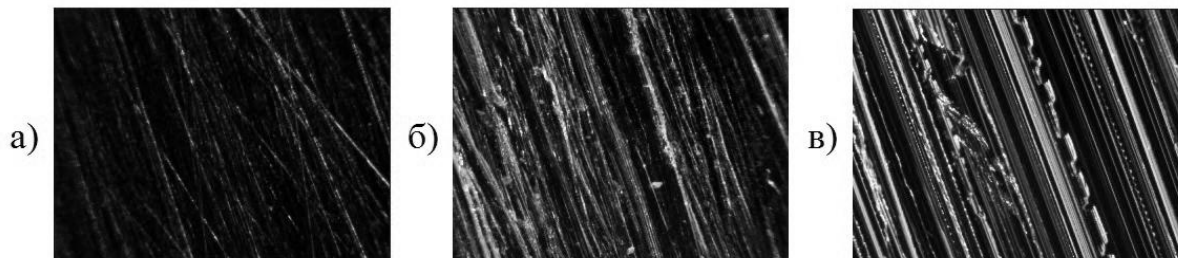


Рис. 1. Образцы меди, снятые с помощью оптического микроскопа.

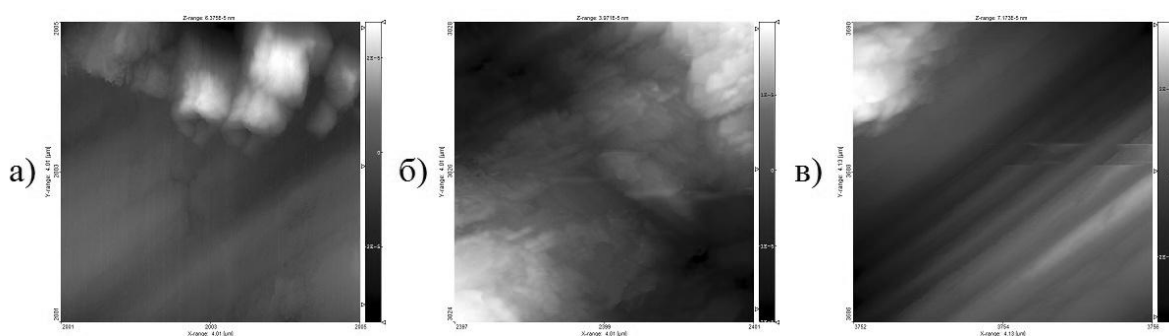


Рис. 2. Снимки, сделанные сканирующим туннельным микроскопом.

Отметим, что исследуемая поверхность меди в общем случае нерегулярна по форме и размерам. На самой поверхности находятся пики и впадины разных размеров. Впадины имеют относительно большую протяжённость, что является следствием механической обработки. Размер выступов и впадин колеблется в зависимости от чистоты обработки.

На рис. 3 представлен профиль шероховатости второго образца. С помощью формулы (1), согласно правилам определения высотного параметра R_z [4], было определено, что шероховатость второго образца $R_{zB} = 4,6$ мкм, что соответствует классу шероховатости $R_z = 5$.

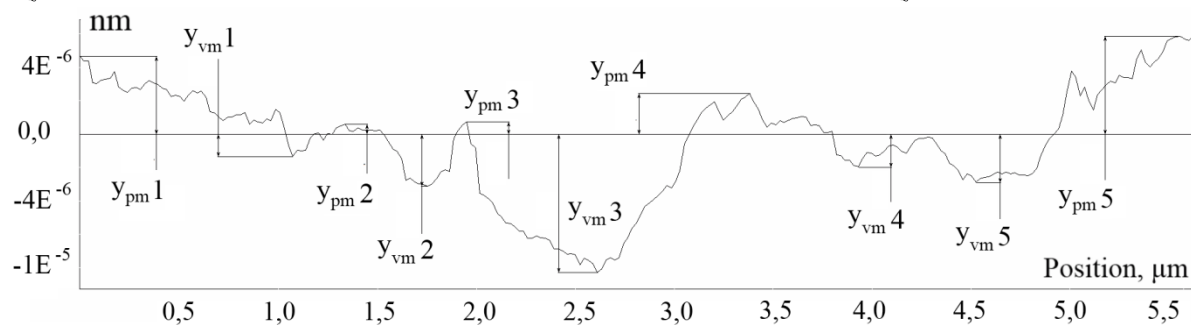


Рис. 3. Профиль шероховатости, соответствующий второму образцу меди.

Аналогичным образом по соответствующим профилям шероховатости, вычислены $R_{zA} = 1,6$ мкм, и $R_{zC} = 8,0$ мкм, что соотносится с классами точности $R_z = 1,6$ и $R_z = 8$.

Топография поверхностей каждого из образцов наглядно проиллюстрирована на рис. 4. Можно видеть, что микроструктура образца В характеризуется многочисленными, сравнительно острыми формами хребтов, в то время как поверхность образца Б покрыта многочисленными выступами с меньшим перепадом высот, а структура поверхности образца А наиболее гладкая.

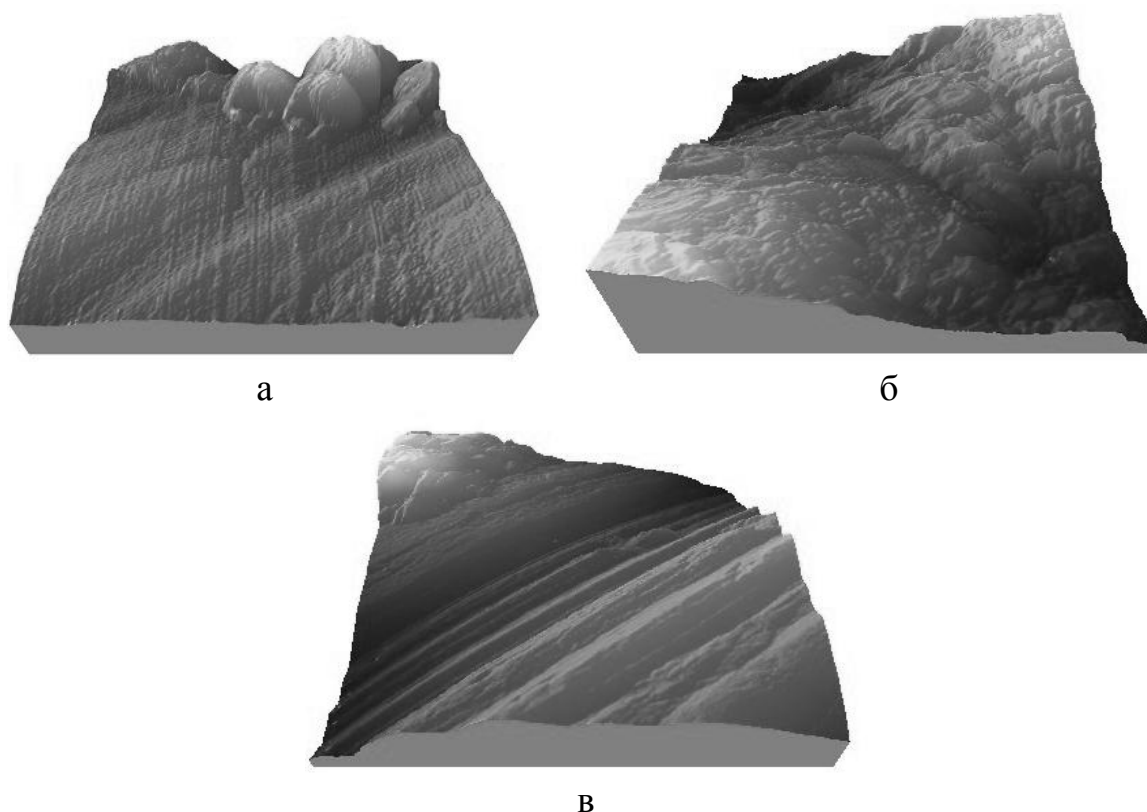


Рис.4. Объёмная визуализация снимков.

Полезность фрактального анализа в исследовании свойств поверхностей установлена, и используется в течение длительного времени. Более того, последние статистические сравнения соответствующих параметров шероховатости выявляют, что фрактальная размерность является наиболее адекватным параметром шероховатости для описания рельефа поверхности [5].

Эта величина может быть оценена с помощью различных методов: метод наименьших квадратов, метод область-периметр, метод вариации, дисперсно-корреляционный метод. Эти методы обеспечивают эффективное средство для оценки фрактальной размерности общих двумерных объектов и, как таковые, давно известные и распространены.

Оценка фрактальной размерности изображения, полученного при помощи СТМ выполнена с применением оригинальных серых изображений, При этом полутоновые изображения переводились в двоичные черно-белые изображения и получали значение на каждый пиксель либо 1 («белый») либо 0 («черный»), в зависимости от своей первоначальной яркости. Это даёт более высокий или низкий уровень среднего значения по распределению яркости изображения. Таким образом, фрактальные размерности образцов были получены связью с фрактальной размерностью полутоновых изображений, черных и белых областей изображения, соответственно.

В Таблице 1 приведены соотношения между фрактальными размерностями образцов, выведенные из приведенных фотографий СТМ, и соответствующими им параметрами шероховатости.

Таблица 1. Соотношение фрактальной размерности и шероховатости.

	Образец А	Образец Б	Образец В
Шероховатость	$R_z = 1,6$	$R_z = 5$	$R_z = 8$
Фрактальная размерность	$2,16 \pm 0,04$	$2,14 \pm 0,04$	$2,15 \pm 0,04$

Постоянство (с учётом погрешности определения) фрактальной размерности указывает на то, что независимо от обработки поверхность остаётся самоподобной, меняется лишь величина неровностей R_z . Часто при решении различных физических и технологических задач возникает необходимость моделирования рельефа поверхности. Как следует из Таблицы 1 для этого достаточно задать среднюю величину перепада высот шероховатости и фрактальную размерность. Далее поверхность можно задать (построить) с использованием стандартных методик, описанных в теории фракталов.

Таким образом, фрактальная размерность D выведенная из серой шкалы микрографии поверхности с помощью СТМ является хорошим критерием, определяющим общий рельеф поверхности. Низкое значение фрактальной размерности, соответствует гладкой поверхности с закругленным профилем. Высокие значения фрактальной размерности указывают на поверхность с более сложным рельефом. Фрактальная размерность D , зависящая от участков повышения и занижения поверхности (возвышенности и провалы) оказывается мало связанной с параметрами шероховатости R_z . Фрактальный подход обеспечивает существенную информацию о рельефе поверхности и может дать понимание процессов, отвечающих за топографические изменения. Расчёты показали, что фрактальная размерность носит достаточно универсальный характер с погрешностью $\pm 0,04$. Модель шероховатости на

основе фракталов может быть использована при моделировании различных физических процессов, для которых шероховатость поверхности является определяющим фактором, в частности: турбулентности, трении, химической кинетики гетерогенных процессов и ряда других.

Библиографический список:

1. **Бахтизин, Р.З.** Сканирующая туннельная микроскопия - новый метод изучения поверхности твердых тел / Р.З. Бахтизин // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – № 11.
2. **Федоренко, В.А.** Справочник по машиностроительному черчению / В.А. Федоренко, А.И. Шошин. – 14-е изд., перераб. и доп.; под ред. Г.Н. Поповой. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. – 416 с.
3. **Mahovic Poljacek, S.** Comparison of fractal and profilometric methods for surface topography characterization / S. Mahovic Poljacek, D. Risovic, K. Furic, M. Gojo // Applied Surface Science. – 2008. – V. 254. – I. 11. – P. 3449-3458.
4. **Гжиров, Р.И.** Краткий справочник конструктора: Справочник / Р.И. Гжиров. – Л: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. – 464 с.
5. **Герасимова, О.Е.** Моделирование шероховатой поверхности / О.Е. Герасимова, С.Ф. Борисов, С.П. Проценко // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16. – № 6. – С. 40-43.