

Стохастическая кластеризация поверхности при взаимодействии плазмы с материалами

В. П. Будаев¹⁾

Национальный исследовательский университет “МЭИ”, 111250 Москва, Россия

Научно-исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 января 2017 г.

Неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со свойствами самоподобия структуры гранулярности от нано- до макромасштабов наблюдается у различных материалов после действия мощных потоков высокотемпературной плазмы в термоядерных установках. Оценены спектральные и статистические характеристики иерархической гранулярности и масштабной инвариантности, которые качественно отличаются от свойств простейшей шероховатости типа броуновская поверхность и кластеризации в иных условиях, что, возможно, обусловлено универсальными механизмами формирования стохастической кластеризации материалов под влиянием высокотемпературной плазмы.

DOI: 10.7868/S0370274X17050071

1. Введение. В последние годы обнаружены эффекты стохастической кластеризации поверхности с иерархической гранулярностью (статистическим самоподобием – фрактальностью) при воздействии на материал экстремальных плазменно-тепловых нагрузок. Такая структура поверхности твердого тела наблюдается после воздействия плазмы на материалы в лабораторных термоядерных установках (ТУ), в плазменных, электронно-лучевых и лазерных установках [1, 2] при плазменно-тепловых испытаниях мощными пучками и проникающим излучением, где в процесс одновременно вовлечены множественные механизмы эрозии и переосаждения эродированного материала, плавления, движения и отверждения поверхностных слоев на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров. Свойства масштабной инвариантности структуры таких материалов определяют связность образца и формирование перколяционного кластера дефектов и диссипативных структур в широком диапазоне масштабов, начиная от субмикронных масштабов. В литературе обсуждаются гипотезы об универсальных скейлингах стохастических объектов и процессов со свойством масштабной инвариантности (статистическим самоподобием) [3–5], за которую ответственны “скрытые” статистические симметрии. Характерными свойствами таких объектов и процессов являются статистическая неоднородность и многомасштабная инвариантность, описываемая степенными законами (скейлингами). Масштабная инвариантность в структу-

ре, процессы самоорганизации диссипативных структур на нано- и мезоуровне могут определять универсальные свойства поведения твердого тела на макроуровне.

Неоднородная кластеризация материалов является предметом теорий различной степени сложности [5], в том числе кинетических моделей, основанных на уравнении Смолуховского [6, 7], для описания нерегулярных структур, наблюдаемых в твердых телах и агломератах разных масштабов. В кинетических моделях для описания агломерации с формированием самоподобной структуры рассматриваются степенные ядра и автомодельные решения со степенным спектром для количества N частиц с массой m [8]:

$$N(m) = Cm^{-(3+\eta)/2}, \quad (1)$$

где η – характеристика самоподобия (автомодельности ядра), C – постоянный коэффициент. Для создания наиболее полной теоретической модели следует привлекать экспериментальные данные о свойствах статистического самоподобия – скейлингах самоподобия (степенных законах масштабной инвариантности) стохастической поверхности. На этом пути важно из эксперимента определить наиболее общие степенные законы, реализуемые в реальных процессах кластеризации. Выявленные степенные законы позволят продвинуться в описании и систематизации симметрий масштабной инвариантности (дилатационных симметрий) твердых тел и агломератов.

В данном Письме приводятся результаты обобщающего анализа спектральных и статистических

¹⁾e-mail: budaev@mail.ru

Таблица 1. Характеристики рельефа экспериментальных образцов: показатель скейлинга фурье-спектра p , показатель Херста H , коэффициент мультифрактальности – уширение спектра $D(h)$

#	Образец	p	H	Мультифрактальность
1	Вольфрам, облучен плазмой в КСПУ-Т, 2 импульса с нагрузкой 2 МДж/м^2 , рис. 1b [9–11]	–2.62	0.86	1.23
2	Вольфрам, облучен плазмой в КСПУ-Т, более 50 импульсов с нагрузкой 2 МДж/м^2 , [9–11]	–3.18	0.81	0.58
3	Углеродная пленка из токамака Т10, образец # 1 из [12]	–2.49	0.78	0.55
4	Углеродная пленка из токамака Т10, образец # 2 из [12], рис. 1b	–2.59	0.77	0.74
5	Углерод, графитовая мишень из установки NAGDIS-II [13]	–2.29	0.68	0.91
6	Сталь нержавеющая, облучена плазмой в КСПУ-Т [15]	–2.85	0.72	0.50
7	Сталь нержавеющая, облучена плазмой в КСПУ-Т [14]	–2.87	0.68	0.47
8	Молибден, после облучения в магнетронном разряде [16], рис. 1c	–2.2	0.6	0.25
9	Стальная отливка после отверждения, рис. 1d	–2.41	0.58	0.1

свойств стохастической кластеризации поверхности тугоплавких материалов после действия горячей плазмы в термоядерных установках. Проводится сравнение с кластеризацией в условиях, отличающихся от воздействий высокотемпературной плазмы. Рассматриваются характеристики самоподобия структуры поверхности от наномасштабов до макромасштабов на основе данных профилометрии высокого разрешения, растрового электронного (РЭМ) и сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ).

2. Экспериментальные образцы. *Вольфрамовые образцы* (# 1 и # 2 в табл. 1), изготовленные из поликристаллического вольфрама с исходной гладкой поверхностью, после испытаний высокотемпературной плазмой в установке плазменный ускоритель КСПУ-Т имеют стохастическую структуру поверхности (эксперимент и характеристики образцов описаны в [9]). Энергонагрузка плазмы на материал в импульсе длительностью ~ 0.5 мс составляла величину до $\sim 2 \text{ МДж/м}^2$, что имитирует экстремально высокие нагрузки при срыве плазменного разряда в токамаке, в том числе в ИТЭР [2]. В процессе воздействия на вольфрамовый образец плазменного пучка диаметром ~ 10 см создаются условия для интенсивной эрозии и изменения поверхности: в центральной зоне образца поверхность оплавляется, формируются условия для поступления в приповерхностную плазму вольфрама в виде ионов, атомов, кластеров и капель, переосаждения материала из плазмы на поверхность и сложных, в том числе волнообразных, передвижений расплава по поверхности. В результате после нескольких (от 2 до ~ 50) импульсов в периферийной зоне воздействия плазменного пучка формируется шероховатая поверхность со стохастической кластеризацией. Наблюдается из-

резанная стохастическая топография этой поверхности с разными масштабами гранулярности, начиная от нанометров (рис. 1a, b), в том числе с уникальной иерархической гранулярностью типа “цветная капуста”, которая наблюдалась ранее для углеродных материалов [1].

Рентгеновские и металлографические исследования образцов [9] показали, что в поверхностном слое толщиной от ~ 100 до ~ 400 мкм формируется аморфная структура вольфрама с признаками дендритной структуры, значительно отличающаяся от структуры кристаллического вольфрама.

Для вольфрамового образца (# 1 в табл. 1) получены профили с высоким разрешением путем построения сшивки до 20 “кадров” АСМ размером 10×10 мкм (каждый 512×512 точек) на базовом масштабе до 0.2 мм (см. рис. 1b). Разрешение АСМ по высоте составляет $\sim 1 \text{ \AA}$, разрешение по базе – 20 нм. Процедура получения таких профилей описана в [12]. Профили высот демонстрируют значительную стохастическую неоднородность на масштабах от нанометров до сотен микрометров.

Углеродные материалы со стохастической кластеризацией поверхности получены после действия высокотемпературной плазмы: образцы углеводородных пленок из токамака Т-10 [12] (# 3 и # 4 в табл. 1) и графитовый тест-лимитер из плазменной установки NAGDIS-II (# 5 в табл. 1, описание этих графитовых образцов дано в [13]). Углеводородные пленки из токамака Т-10 (см. [1, 12]) получены при энергонагрузке плазмы на материал от $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$ (в стабильной стадии разряда токамака) до $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$ (при срыве разряда); общее время воздействия высокотемпературной плазмы на такие образцы было более 1000 с (более 1000 разрядов токамака). Графи-

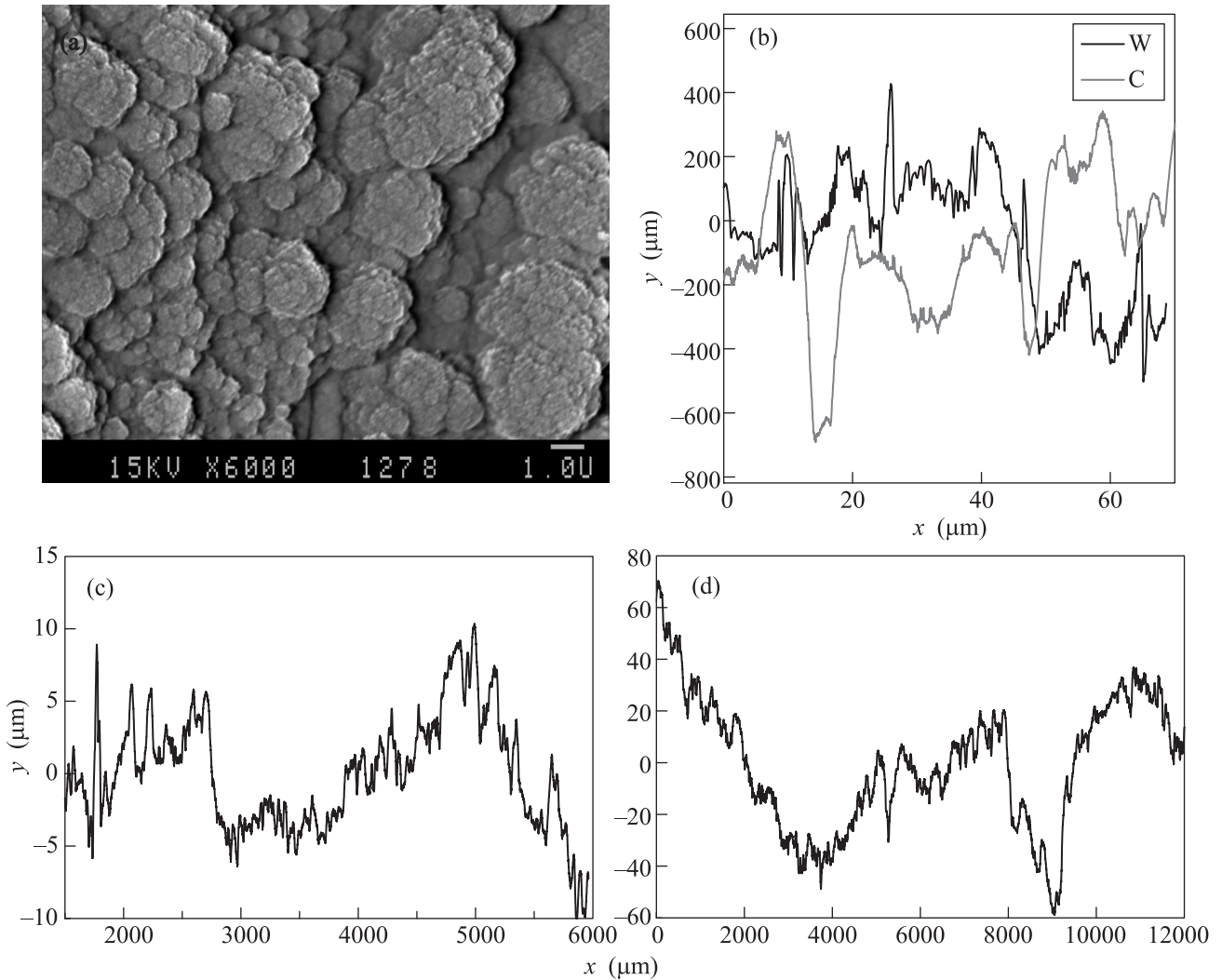


Рис. 1. Рельеф поверхности образцов. (а) – Микрофотография РЭМ-образца вольфрама после воздействия высокотемпературной плазмы в КСПУ-Т [9–11]. (б) – Профили высот образца #1 вольфрама (W) после воздействия высокотемпературной плазмы в КСПУ-Т и образца #4 углеводородной пленки (С), сформированной под воздействием высокотемпературной плазмы в токамаке Т-10 в экспериментах с графитовым лимитером [12]. (с) – Профиль шероховатости образца #8 Мо после экспонирования в магнетронном разряде [16]. (d) – профиль шероховатости промышленной стальной отливки #9

товые образцы из NAGDIS-II получены после стационарной плазменной нагрузки до $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$ в течение длительной экспериментальной кампании.

Образцы нержавеющей стали (#6 и #7 в табл. 1) получены после воздействия мощных пучков высокотемпературной плазмы в КСПУ-Т [14, 15]. Исследовались зоны поверхности таких образцов, где формируется стохастическая топография поверхности с признаками дендритной структуры.

“Сравнительные образцы” получены в условиях, отличающихся от условий в ТУ. Образец #8 в табл. 1 – поверхность молибдена (Mo), рис. 1с, после длительного воздействия магнетронного разря-

да; анализировалась зона с максимальной шероховатостью на границе действия плазмы, метод получения такого образца описан в [16]; свойства поверхности и осаждения материалов на поверхность в магнетронном разряде рассматриваются в обзоре [17]. Образец #9 в табл. 1 – стальная отливка (конструкционная нелегированная сталь) с необработанной шероховатой поверхностью, которая сформирована после отверждения в литейной форме, рис. 1d. Этот образец является типичным примером отверждения расплавов, общие характеристики шероховатости поверхности таких отливок регламентируются промышленными стандартами (см., например, [18]). В сравнитель-

ных образцах стохастическая поверхность (шероховатость) сформировалась преимущественно при доминирующем влиянии лишь одного механизма: или баллистического осаждения продуктов эрозии на поверхность из низкотемпературной плазмы (Мо), или плавления-отвердевания (стальная отливка).

3. Спектральные и статистические характеристики стохастических рельефов. Фурье-спектры профилей рельефа (рис. 2) характеризуют

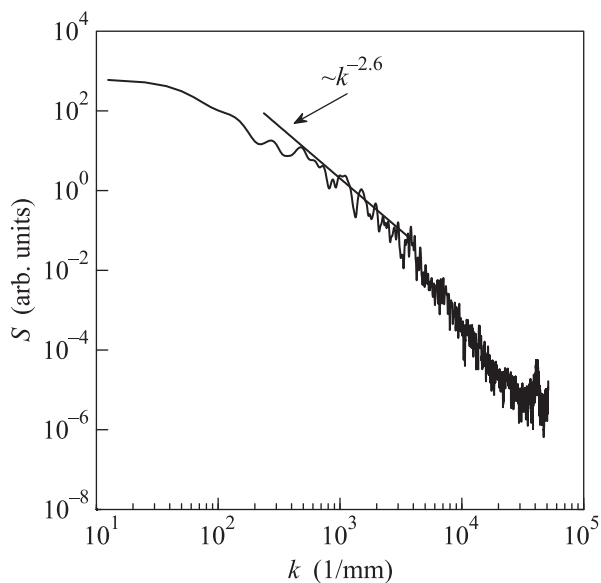


Рис. 2. Фурье-спектр стохастического рельефа образца # 1 вольфрама, приведена подгонка степенным законом (пунктирная линия)

распределение высот (размеров структур на поверхности) по масштабам. Спектры высот рельефа экспериментальных образцов уширены, без резонансов, что указывает на отсутствие доминирующих периодических структур в рельефе. Спектры имеют характерную форму, обычно наблюдаемую в объектах, обладающих масштабной инвариантностью и статистическим самоподобием. Функциональную зависимость фурье-спектра от волнового числа k можно характеризовать степенным законом $S(k) \sim k^p$ (см. рис. 2).

Для образцов вольфрама, нержавеющей стали и графита после воздействия высокотемпературной плазмы в токамаке Т-10, плазменных установках КСПУ-Т и NAGDIS-II величина показателей p имеет значение в диапазоне от -2.4 до -2.8 и более (см. табл. 1). В отличие от этого, для сравнительных образцов величина показателей p находится в диапазоне от -1.97 до -2.2 . Такое отличие можно рассматривать в рамках кинетического подхода (см.

[7, 8]), предсказывающего различие спектров (1) для разных свойств самоподобия (автомодельности) агломерации. Следует отметить, что наклон спектра (см. рис. 2) изменяется в области малых и больших значений k , что свидетельствует о многомасштабности и статистической неоднородности рельефа. Такие свойства детально описываются с применением статистического анализа. Для количественного описания статистических свойств самоподобия стохастической структуры используют функцию распределения (ФР) высот рельефа образца, которая строится как нормированная гистограмма высот профиля (см. [1]). Напомним, что гауссовский закон описывает простейшую статистически однородную шероховатую поверхность, например, броуновскую. Для образцов после воздействия высокотемпературной плазмы ФР типично имеет “тяжелые” хвосты и не описывается гауссовским (нормальным) законом. Такое свойство имеют образцы углеродных (графитовых) материалов после экспонирования в токамаке Т-10 [1] и в плазменной установке с высокотемпературной плазмой NAGDIS-II [13], нержавеющей стали в плазменной установке КСПУ-Т [14, 15].

На рис. 3а показана ФР высот образца вольфрама – она значительно отклоняется от гауссового закона и не описывается также другими известными в теории вероятности законами, например, законом Коши–Лоренца. Для сравнения на рис. 3б приведена ФР высот рельефа образца отливки промышленной стали, шероховатая поверхность которой сформировалась при отверждении после плавления. Эта ФР близка к гауссовой функции, что свидетельствует о простейших статистических свойствах (статистической однородности) кластеризации. Гауссова форма функции распределения высот рельефа типично наблюдается для объектов с простейшей шероховатостью.

Для описания свойств самоподобия (масштабной инвариантности в статистическом смысле) профиля высот $y(x)$ следует использовать несколько характеристик, включая показатель (индекс) Херста, скейлинг структурной функции, спектры мультифрактальности [1, 12]. Показатель Херста H характеризует самоподобие в предположении независимости его свойств от масштаба наблюдения, что позволяет сравнивать исследуемый процесс с известными теоретическими моделями стохастических объектов, для которых известен показатель Херста. Если функция $y(x)$ самоподобна с показателем H , то для приращений $\delta y = y(x + l) - y(x)$ ФР равна $P_l(\delta y) = \lambda^H P_{\lambda l}(\lambda^H \delta y)$. Значения показателей Херста H для профилей рельефа исследованных образцов

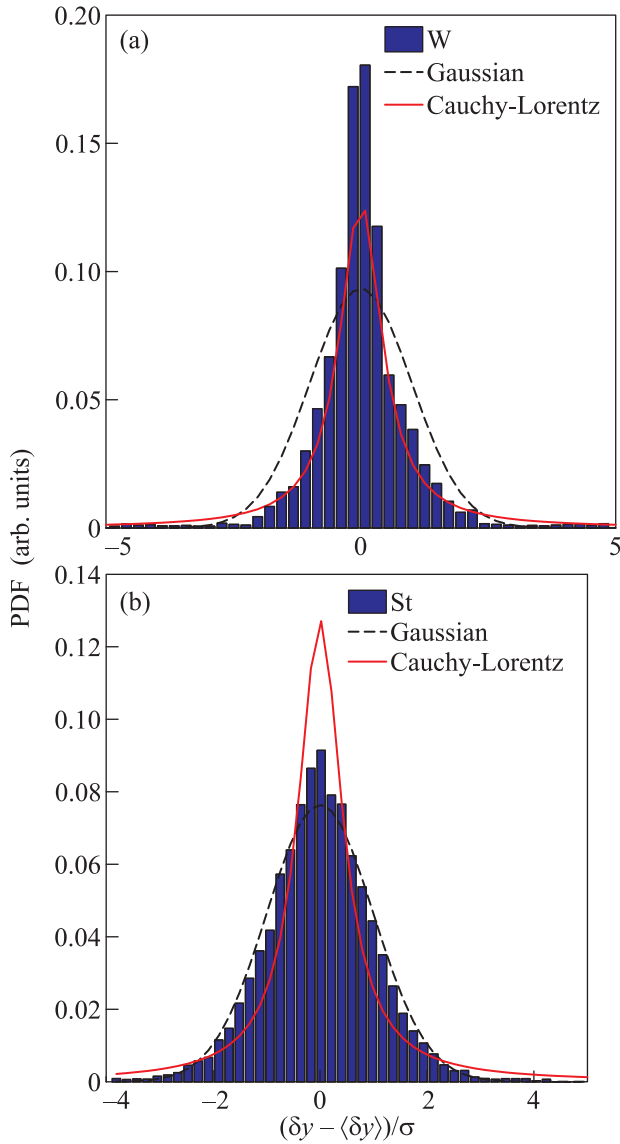


Рис. 3. (Цветной онлайн) Функция распределения высот рельефа образцов для приращений $\delta y = y(x + l) - y(x)$. (a) – Вольфрам, рис. 1b, $l = 19.5$ нм. (b) – Сталь, рис. 1d, $l = 0.5$ мкм. Для сравнения дано гауссово распределение (пунктир) и закон Коши–Лоренца (сплошная красная линия)

приведены в табл. 1 (процедура оценки H описана в [1]). Для образцов вольфрама, графита и нержавеющей стали после воздействия высокотемпературной плазмы в токамаке Т-10, установках КСПУ-Т и NAGDIS-II величина показателя Херста составила от 0.68 до 0.86. Значение $H > 1/2$ означает персистентное поведение (тренд). Именно это свойство соответствует нерегулярной стохастической кластеризации с иерархической гранулярностью (фрактальностью), наблюдаемое для образцов из токамаков и

других ТУ [1, 12, 13]. Такая величина H от 0.68 до 0.86 соответствует фрактальной размерности поверхности $d_f = 2.13–2.32$ (показатель Херста H связан с фрактальной размерностью поверхности d_f как $H = 3 - d_f$, см. [1]). Указанная размерность сравнима с фрактальной размерностью гранулярности (перколяции) многих типов твердых тел с нерегулярной структурой, например, наблюдаемой в металлических стеклах ($d_f = 2.31$), агрегатах кремния ($d_f = 2.27 \div 2.65$), квази-кристаллах [19, 20].

Для более детального описания стохастической структуры анализируется статистическая неоднородность гранулярности: исследуются зависимости функции распределения для разностей $\delta_l y$ от масштаба l . Для рельефов образцов из ТУ такие ФР зависят от масштаба, изменяясь от квази-гауссовой на больших масштабах лага l к негауссовой форме с “тяжелыми хвостами” на малых лагах l (см. пример в [12]). Такое свойство статистической неоднородности называется мультифрактальностью; им обладают стохастические объекты, для описания которых, в отличие от регулярных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной величины – фрактальной размерности, а необходим целый спектр таких размерностей (в зависимости от локальных показателей масштабной инвариантности – показателей Гельдера h). Для характеристики таких объектов применяют спектр размерностей $D(h)$ (называемый также мультифрактальным спектром или спектром сингулярностей). Спектр $D(h)$ для исследованных рельефов приведен на рис. 4 (процедура оценки $D(h)$ из экспериментальных данных описана в [21]). Из теории

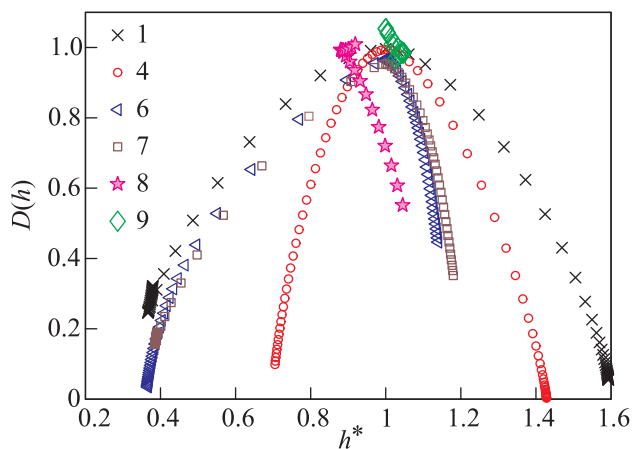


Рис. 4 (Цветной онлайн) Статистические свойства стохастического рельефа образцов из табл. 1. Мультифрактальный спектр $D(h)$ в зависимости от нормированного показателя Гельдера $h^* = 1 + (h - h_{D\max})$ (центрированного в 1, значение в максимуме $h_{D\max}$)

известно, что для монофрактального объекта (например, классического броуновского процесса) $D(h)$ представляет собой единственную точку с единственным показателем Гельдера. Уширенный спектр $D(h)$ с колоколообразной формой наблюдается для образцов из ТУ (см. рис. 4). Два признака спектра (уширение и колоколообразность) являются типичным признаком мультифрактальных стохастических объектов и процессов, наблюдаемых в природе [21]. Максимум $D(h)$ для всех спектров почти достигает величины 1, что означает сингулярность профиля $y(x)$. Величина уширения спектра количественно характеризует свойство мультифрактальности – отклонение от простейшего самоподобия (монофрактальности); в литературе эта величина обозначается как коэффициент мультифрактальности. В целом, уширение спектра $D(h)$ для исследованных профилей рельефа образцов из ТУ лежит в диапазоне 0.5–1.2 (см. табл. 1).

Подобные значения являются типичными для стохастических объектов и процессов с сильной статистической неоднородностью, наблюдаемых в природе [21, 22]. Для рельефа сравнительных образцов (молибдена и стальной отливки) спектр $D(h)$ значительно отличается, величина его уширения менее 0.2–0.3 (см. табл. 1). Метод структурных функций [21] позволяет детально описать неоднородность ФР на различных масштабах. Структурные функции (моменты) порядка q для разностей $\delta_l y = y(x + l) - y(x)$ на пространственном масштабе l , определяются как $S_q(l) = \langle |\delta_l y|^q \rangle$, статистическое усреднение (...) проводится с весовой функцией – функцией распределения для $\delta_l y$. Характеристикой структурной функции является ее скейлинг $\zeta(q)$ степенного закона $S_q(l) \sim l^{\zeta(q)}$. Анализ скейлинга $\zeta(q)$ позволяет описать свойства самоподобия [12, 21]. Линейная зависимость $\zeta(q)$ от q свидетельствует о простейшем самоподобии – статистической однородности. Для объектов с мультифрактальной статистикой (т.е. статистически неоднородных) наблюдается нелинейная зависимость $\zeta(q)$. Для рельефа образцов из термоядерных установок скейлинг $\zeta(q)$ является нелинейной функцией от q (рис. 5). Форма скейлинга – выпуклая, подобно, например, скейлингу логпуассоновской модели каскадного процесса (см. рис. 5), что является типичным для мультифрактальных объектов, наблюдаемых в природе [21]. В отличие от этого, сравнительные образцы Мо и промышленной стали характеризуются спектром $\zeta(q)$ (см. рис. 5), близким к линейному закону для шероховатости с простейшим самоподобием.

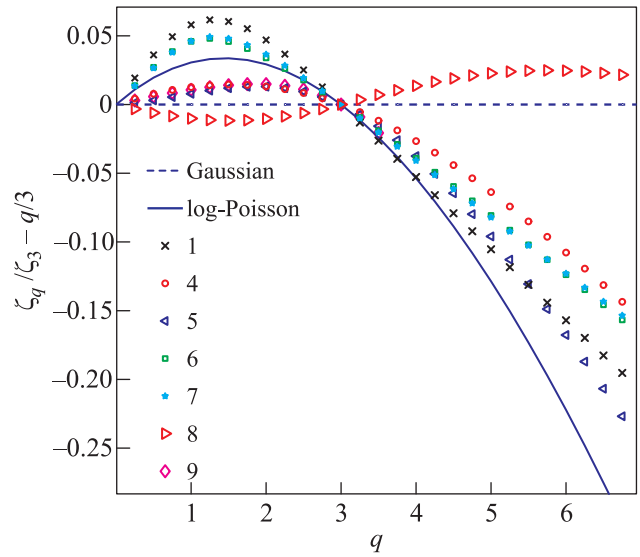


Рис. 5. (Цветной онлайн) Скейлинг структурной функции ζ_q , нормированный на скейлинг ζ_3 для $q = 3$. Для сравнения приведен логпуассоновский скейлинг (линия). Обозначения соответствуют # образца в табл. 1

4. Обсуждение и заключение. Для различных по химическому составу и исходной кристаллической структуре материалов (вольфрама, углеродных материалов, нержавеющей стали) после действия мощных потоков высокотемпературной плазмы в ТУ в данном обобщающем анализе обнаружена неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со схожими свойствами самоподобия структуры гранулярности от нано- до макромасштабов. В том числе, для вольфрама впервые выявлены иерархическая гранулярность и самоподобие. Кластеризация материалов из ТУ качественно отличается от простейшей шероховатости типа броуновской поверхности и кластеризации в иных условиях, что показано на примерах сравнительных образцов – молибдена после экспонирования в плазменной установке с магнетронным разрядом и образца отливки стали с типичной простейшей шероховатостью, сформированной при отвердевании после плавления. В ТУ движение материала при кластеризации поверхности происходит под влиянием стохастических электромагнитных полей, формируемых приповерхностной плазмой [21], которые обеспечивают дальние корреляции и условия для роста агломератов с самоподобной структурой [1, 23]. В дополнение к такому процессу, при критической нагрузке на материальную поверхность вклад в процесс кластеризации вносят эффекты движения материала (расплава) по поверхности (см., например, [5]). Эти множественные эффекты приводят к механизму фрактального роста на масштабах

от нескольких десятков нанометров до сотен микрометров (см. обсуждение в [1, 4, 5, 13, 18, 23]), доминирующим фактором которого являются не физико-химические характеристики исходных материалов, а коллективные эффекты стохастической кластеризации. Приведенные выше экспериментальные результаты, возможно, указывают на *универсальные механизмы формирования стохастической кластеризации материалов под влиянием высокотемпературной плазмы*. Количественные характеристики статистической неоднородности структуры материалов из ТУ, в том числе уширение мультифрактального спектра 0.5–1.2, находятся в диапазоне, наблюдаемом для типичных мультифрактальных объектов и процессов в природе.

Работа выполнена при поддержке ГК Росатом РФ по программе испытаний материалов ИТЭР в Проектном Центре ИТЭР РФ и частично Мегагрантом Правительства РФ # 14.Z50.31.0042. Автор выражает благодарность А.В. Карпову за выполнение профилометрических измерений, группе КСПУ-Т, А.В. Рогову, проф. Н. Оно за возможность использовать экспериментальные образцы, Л.Н. Химченко и Ю.В. Мартыненко за полезные обсуждения.

1. В. П. Будаев, Л. Н. Химченко, *ЖЭТФ* **131**(4), 711 (2007).
2. В. П. Будаев, *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термоядерный синтез* **38**(4), 5 (2015).
3. В. В. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, New York (1982).
4. Б. М. Смирнов, *УФН* **161**, 171 (1991).
5. A. L. Barabasi and H. E. Stanley, *Fractal Concepts in Surface Growth*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1995).
6. M. V. Smoluchowski, *Z. Phys. Chem.* **91**, 129 (1917).
7. В. М. Волощук, *Кинетическая теория коагуляции*, Гидрометеоздат, Л. (1984), 284 с.
8. C. Connaughton, R. Rajesh, and O. Zaboronski, *Phys. Rev. Lett.* **94**(19), 194503 (2005).
9. V. P. Budaev, Yu. V. Martynenko, A. V. Karpov, N. E. Belova, A. M. Zhitlukhin, N. S. Klimov, V. L. Podkovyrov, V. A. Barsuk, A. B. Putrik, A. D. Yaroshevskaya, V. M. Safronov, R. N. Giniyatulin, and L. N. Khimchenko, *J. Nucl. Mater.* **463**, 237 (2015).
10. A. Zhitlukhin, J. Linke, A. Loarte, M. Merola, V. Podkovyrov, G. Federici, B. Bazylev, S. Pestchanyi, V. Safronov, T. Hirai, V. Maynashev, V. Levashov, and A. Muzichenko, *J. Nucl. Mater.* **363**:**365**, 301 (2007)
11. В. П. Будаев, Ю. В. Мартыненко, А. В. Карпов, Н. Е. Белова, А. М. Житлухин, Н. С. Климов, В. Л. Подковыров, В. А. Барсук, А. Б. Путрик, А. Д. Ярошевская, *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез* **36**(3), 53 (2013).
12. В. П. Будаев, С. А. Грашин, А. В. Карпов, С. В. Краевский, Л. Н. Химченко, *Письма в ЖЭТФ* **95**(2), 84 (2012).
13. В. П. Будаев, Л. Н. Химченко, *Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерной синтез* **3**, 34 (2008).
14. В. П. Будаев, Ю. В. Мартыненко, Л. Н. Химченко, А. М. Житлухин, Н. С. Климов, Р. А. Питтс, И. Линке, Б. Базылев, Н. Е. Белова, А. В. Карпов, Д. В. Коваленко, В. Л. Подковыров, А. Д. Ярошевская, *Физика плазмы* **39**, 923 (2013).
15. М. А. Брутян, В. П. Будаев, А. В. Волков, А. М. Житлухин, А. В. Карпов, Н. С. Климов, И. С. Меньшов, В. Л. Подковыров, А. Ю. Урусов, А. А. Успенский, М. В. Устинов, *Ученые записки ЦАГИ* **44**(4), 15 (2013).
16. А. В. Рогов, К. Ю. Вуколов, *Вопросы атомной науки и техники, Серия Термоядерный синтез* **1**, 25 (2005).
17. П. В. Каштанов, Б. М. Смирнов, Р. Хипшлер, *УФН* **177**, 473 (2007).
18. М. Г. Афонькин, М. В. Магницкая, *Производство заготовок в машиностроении*, Машиностроение, М. (1987), 256 с.
19. D. Ma, A. D. Stoica, and X.-L. Wang, *Nature Mater.* **8**, 30 (2009).
20. M. Fratini, N. Poccia, A. Ricci, G. Campi, M. Burghammer, G. Aeppli, and A. Bianconi, *Nature* **466**, 841 (2010).
21. В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зеленый, *УФН* **181**, 905 (2011).
22. J. F. Muzy, J. Delour, and E. Bacry, *Eur. Phys. J. B* **17**, 537 (2000).
23. V. P. Budaev and L. N. Khimchenko, *Physica A* **382**, 359 (2007).