УДК 536.75; 620.186:620.19

Применение концепции статистического фрактала при анализе поверхностей деформации образцов

А.А. Иванова, В.В. Лепов, В.С. Ачикасова, А.М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Приведены основные положения концепции статистического фрактала (или мультифрактала) применительно к анализу поверхности деформации образцов из ультрамелкозернистой стали, испытанных на растяжение при комнатных и низких климатических температурах. В результате количественных исследований выявлено, что поверхность деформации в зоне утяжки для образцов из стали, обработанной равноканальным угловым прессованием, менее шероховата и равномерна даже после разрушения при низких климатических температурах. Разрушение имело преимущественно вязкий характер. Применение концепции статистического фрактала позволяет дать количественную характеристику энтропийных процессов, непосредственно связанных с накоплением повреждений и выработкой ресурса.

Ключевые слова: статистический фрактал, поверхность разрушения, ультрамелкозернистая сталь, фрактальная размерность, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, наноструктура.

Application of the Concept of a Statistical Fractal for the Analysis of Surfaces of Samples after Deformation

A.A. Ivanova, V.V. Lepov, V.S. Achikasova, A.M. Ivanov

Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The conception of statistical fractal (or multifractal) has been applied for analyzing the surface of deformation of ultrafine-grained steel specimens tested by tension at room and low climatic temperatures. It has been revealed that the surface of deformation of steel specimens processed by equal channel angular pressing is less rougher and uniform even after the fracture at low climatic temperature. The destruction had mainly ductile character. Application of the conception of statistical fractal allows to make a quantitative evaluation of the entropy processes connected with a damage accumulation and lifetime expiration.

Key words: statistical fractal, fracture surface, ultrafine-grained steel, fractal dimension, severe plastic deformation, equal channel angular pressing, damage, nanostructure.

Введение

В силу особой точности при определении высот поверхности метод сканирующей туннельной микроскопии является наиболее подходящим для количественного исследования поверхностного рельефа изломов и специально подготовленных микроструктур. Универсальность методов зондовой микроскопии и мультифрактального анализа, применяемых для исследования поверхностей разрушения и деформации металлов, позволяет использовать данный подход и для неметаллических, природных и искусственных кристаллических материалов.

Современные электронные сканирующие микроскопы, такие, например, как туннельный или атомно-силовой, позволяют получать подробную информацию о микрорельефе исследуемой поверхности в виде трехмерного массива координат. Разработанный алгоритм расчета

ИВАНОВА Анастасия Анатольевна – м.н.с., anastiv@mail.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. директора по научной работе, lepov@ iptpn.ysn.ru, wisecold@mail.ru; АЧИКАСОВА Валентина Семеновна – инженер, achikasova@iptpn.ysn.ru; ИВАНОВ Афанасий Михайлович – в.н.с., a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru.

основан на концепции статистического фрактала, или мультифрактала, и позволяет характеризовать состояние поверхности. Программа реализована на основе стандартного метода подсчета ячеек в трехмерном массиве [1], в отличие от известной методики мультифрактальной параметризации структуры материалов [2], где используются двумерные изображения, представляющие собой некоторый упрощенный аналог топографических карт [3]. В более общем трехмерном случае функция мультифрактального спектра $f(\alpha)$ строится непосредственно с использованием координат изучаемой поверхности, не требует дополнительной обработки данных и обеспечивает достаточную для количественной диагностики точность вычислений.

Построение функции мультифрактального спектра $f(\alpha)$ обеспечивает целый спектр характеристик мультифрактальной поверхности: не только хаусдорфову размерность поверхности D_0 , но и размерности D_1 , D_2 , а также показатели упорядоченности структуры, наличия в ней периодических составляющих, нарушения симметрии.

В данной статье представлены результаты мультифрактального анализа поверхностей образцов из наноструктурированной стали Ст3сп, испытанных на растяжение [4]. Отметим, что концепция статистического фрактала применима и к поверхностям кристаллов природного алмаза с естественными и технологически обработанными гранями [5].

Методика эксперимента

Образцы из ультрамелкозернистой стали СтЗсп испытаны на растяжение на разрывной машине UTS-20K, согласно ГОСТ 1497-84 «Методы испытаний на растяжение». Режим обработки стали равноканальным угловым прессованием (РКУП) соответствовал маршруту «C», температура прессования составляла 400°С, число циклов прессования (n) – 2 и 8, угол пересечения каналов – 120° [4]. Механические свойства образцов показаны в табл. 1.

верхности деформации, находящиеся на расстоянии около 3 мм от места разрыва. Кроме определения мультифрактального спектра и соответствующих характеристик, визуально по изображениям выявлены наиболее вероятные механизмы деформирования и разрушения [4–6].

На рис.1 представлены фотографии зоны разрыва образцов из исходного материала и обработанных РКУП по маршруту «*C*» при 400°С.



Рис. 1. Фотографии зоны разрыва образцов, испытанных на разрыв при температурах: а – 20° С (исходная сталь); б – 20° С (сталь после 2 проходов РКУП); в – - 60° С (сталь после 2 проходов РКУП); г – 20° С; д – -60° С. В нижнем ряду представлена сталь после 8 проходов РКУП)

Мультифрактал обладает более сложной структурой по сравнению с однородным фракталом. Чтобы наглядно представить себе концепцию статистического фрактала, применяемую в качестве методики количественного анализа, рассмотрим некую кривую в области пространства, разбитого

Таблица	1	
---------	---	--

№ образца	Количество циклов <i>п</i> РКУП	Температура испытания, °С	<i>σ</i> т, МПа	<i>σ</i> в, МПа	Относ. удлинение при разрыве образца, δ, %	Примечания
1	_	20	324,4	498,4	14,5	Исходное состояние – состояние поставки
2	2	20	750	791	4,95	После РКУП
3	2	-60	825	863,5	8,95	//
4	8	20	830	844	5,36	//
5	8	-60	915	921,5	5,10	//

Данные механических испытаний на растяжение образцов из наноструктурированной стали СтЗсп

В ходе мультифрактального анализа рассмотрены трехмерные массивы изображений по-

на *і* ячеек размером ε . При этом появляется вероятность относительной заселенности ячеек p_i , показывающая, сколько точек кривой (фрактала) попало в данную ячейку. С уменьшением размера ячейки эта вероятность будет уменьшаться, и для самоподобных множеств эта зависимость носит степенной характер [1]:

$$p_i \approx \varepsilon^{\alpha_i}$$

где α_i – показатель степени, для каждой ячейки свой (если рассматривать мультифрактал). В случае обычного, однородного фрактала, все α_i будут одинаковы:

$$p_i \approx \varepsilon^{\alpha_i} = \varepsilon^{\alpha} = \varepsilon^{D}$$

где *D* – фрактальная размерность. Однако более распространенными в природе являются статистические фракталы, которые можно определить, как объединение фрактальных множеств разных размерностей. Для каждого подмножества, составляющего мультифрактал, характерна одинаковая вероятность заполнения ячеек $p_i \approx \varepsilon^{\alpha_i}$. Поскольку мультифрактал объединяет в себе все эти подмножества с разными вероятностями, полностью характеризуется он функцией мультифрактального спектра $f(\alpha)$, значения которой при разных α и есть фрактальные размерности однородных подмножеств, составляющих мультифрактал.

Таким образом, кроме геометрических свойств, мультифрактал обладает статистическими свойствами. Поэтому для его описания наряду с функцией мультифрактального спектра $f(\alpha)$ используется спектр обобщенных размерностей D_q , который задается с помощью нелинейной функции $\tau(q)$:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \ \tau(q) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\ln Z(q,\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

где $Z(q,\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^{-q}(\varepsilon) \approx \varepsilon^{\tau(q)}.$

Функция $\tau(q)$ определяет поведение обобщенной статистической суммы $Z(q, \varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$ (ε – размер ячейки). Вероятности, входящие в сумму $Z(q, \varepsilon)$, – описанные выше вероятности относительной заселенности элементов фрактала. Показатель степени q может принимать значения – $\infty < q < +\infty$.

Вычисление спектра обобщённых размерностей Реньи для трехмерной поверхности деформации, а также показателей мультифрактального спектра выполнено средствами программного пакета Mapple [7].

Результаты и обсуждение

Многими авторами ранее исследовались процессы накопления повреждений при деформации образцов из низколегированной стали с помощью фрактографических, оптических и акустических методик [8-10], при этом выявлена как строгая стадийность накопления повреждений, так и экспоненциальные и степенные зависимости, характеризующие плотность распределения микротрещин и микропор. Это обуславливает необходимость применения подхода, основанного на концепции статистического фрактала, позволяющего обосновать количественную характеристику процессов разупорядочения, связанных с энтропией системы, процессами накопления повреждений и выработкой конструкцией ресурса.

Полученные в результате расчета мультифрактальные характеристики сведены в табл. 2.

Т	а	б	Л	И	ц	а	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Мультифрактальные характеристики поверхностей разрушения образцов из наноструктурированной стали Ст3сп

ns nunderpykryphpobullion erusin ereen								
№ образца	1	2	3	4	5			
D_{θ}	2,47	2,25	2,26	2,40	2,21			
D_l	2,43	2,20	2,16	2,39	2,09			
D_2	2,37	2,16	2,13	2,37	2,08			
Κ	1,02	0,795	1,49	1,07	1,63			
$f_{(40)}$	0,13	0,167	0,60	0,07	0,779			
Δ	0,34	0,27	0,145	0,347	0,106			

Наибольшие значения размерностей D_0 , D_1 , D_2 соответствуют образцу из исходного материала. На втором месте по величине указанных размерностей — образец после 8 проходов РКУП, испытанный при комнатной температуре; см. рис. 2, отображающий значения размерностей D_q для всех образцов.

Образец после 8 проходов РКУП, испытанный при комнатной температуре, имеет ровную поверхность рельефа, а разрушение наблюдается по границам мелких зерен или фрагментов. При низкой температуре –60°С местами на поверхность фрагментарно начинают выходить полосы пластической деформации с трещинами по краям. Далее ровный рельеф переходит в упорядоченную по направлению растяжения систему бороздок и полос скольжения, а местами на поверхность выходят фрагменты скоплений зерен, по границам которых проходит пластическая деформация и разрушение.



Рис. 2. Значения мультифрактальных размерностей D_q для образцов из ультрамелкозернистой стали СтЗсп

Поскольку параметры спектра D_0 (размерность Хаусдорфа), D_1 (информационная размерность), D_2 (корреляционная размерность) позволяют судить, как правило, о шероховатости изучаемой поверхности, можно сделать вывод, что РКУП дает более сглаженную структуру. Кроме того, обобщенные размерности Реньи позволяют до некоторой степени оценить термодинамические условия формирования структуры поверхности. Так, большие значения D_q соответствуют более неравновесным условиям формирования структур.

Мера скрытой периодичности K=D(-40)-D(40)(оценка упорядоченности структуры) и степень относительной однородности f(40) характеризуют структуру рассматриваемой поверхности: чем больше значение этих показателей, тем выше содержание в структуре поверхности периодических составляющих, тем более она однородна. Графики, отображающие поведение обоих показателей, схожи по виду (рис. 3).



Рис. 3. Значения показателей скрытой периодичности К и относительной однородности *f*(40) для образцов из ультрамелкозернистой стали СтЗсп

Мера упорядоченности $\Delta = D_{(l)} - D_{(40)}$ отображает нарушение симметрии общей конфигурации структуры поверхности. Увеличение данного параметра отражает рост негэнтропии систе-

мы и возрастание степени ее нарушенной симметрии. Максимальные значения Δ соответствуют исходному образцу и образцу после 8 проходов РКУП. Более упорядочены поверхности образцов после 2 и 8 проходов РКУП, испытанных при низкой температуре. Эти результаты согласуются с предыдущими выводами: после испытаний ультрамелкозернистых образцов при низкой температуре получаем более однородную, упорядоченную структуру поверхности по сравнению со структурой поверхности образцов после РКУП, испытанных при комнатной температуре [4].

По результатам мультифрактального анализа поверхностей образцов, испытанных на растяжение, можно сделать следующие выводы. Наиболее шероховата поверхность образца из исходного материала (испытания при комнатной температуре). Среди образцов после РКУП более шероховатую поверхность имеет образец после 8 проходов, испытанный при комнатной температуре. Более всего периодических составляющих в поверхности образца после 8 проходов РКУП, испытанного при температуре −60°C. этому же образцу соответствует наибольший показатель однородности поверхности. Менее всего однороден образец из стали после 8 проходов РКУП, испытания при комнатной температуре, что согласуется с уровнем шероховатости его поверхности по Dq. Максимальное значение меры упорядоченности Δ , отражающей рост негэнтропии системы и возрастание степени нарушенной симметрии, также соответствует этому образцу.

Следует отметить, что в последнее время применение концепции статистического фрактала значительно расширилось. В частности, изменения в спектре обобщённых размерностей (энтропий) Реньи используются для регистрации точки фазового перехода систем металл-электролит [11]. Как известно, фазовые переходы играют важную роль в процессах накопления повреждений и разрушения в строительных и конструкционных материалах, основаниях и фундаментах сооружений, эксплуатирующихся в условиях криолитозоны.

Таким образом, мультифрактальный анализ позволил выявить характерные особенности процесса разрушения упрочнённой методом РКУП стали, которые состоят в меньшей шероховатости (по сравнению с образцом из исходного материала в состоянии поставки) и большей однородности поверхности при деформации, что существенно повышает хладостойкость материала. Метод мультифрактального анализа позволяет получить количественные показатели изменения характера деформирования материалов при низких температурах [5, 6].

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект №15–41–05010).

Литература

1. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: РХД, 2001. 128 с.

2. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск: РХД, 2001. 116 с.

3. Старостин Е.Е., Колмаков А.Г. Мультифрактальное описание топографической структуры покрытий, полученных термическим напылением в вакууме // ФХОМ. 1998. №5. С. 38–47.

4. Лепов В.В., Иванов А.М., Логинов Б.А., Беспалов В.А., Ачикасова В.С., Закиров Р.Р., Логинов В.Б. Механизм разрушения наноструктурированной стали при низких температурах // Российские нанотехнологии. 2008. №11–12. С. 101–109.

5. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Исследование поврежденности низколегированной стали и кристаллов алмаза методами фрактального анализа // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов в условиях холодного климата. Якутск, 2002. Ч.2. С.93–107. 6. Лепов В.В., Логинов Б.А. Зондовая микроскопия – инструмент нанодиагностики // Наука и техника в Якутии. 2010. №1. С.24–29.

7. Сараев П.В. Основы использования математического пакета Maple в моделировании: Учебное пособие / Международный институт компьютерных технологий. Липецк, 2006. 119с.

8. Встовский Г.В., Гринберг Е.М., Маркова Е.В., Фомичева Н.Б. Фрактографические исследования поверхности изломов стали 09Х16Н4БЛ с использованием прикладного мультифрактального анализа // Перспективные материалы. 2012. №5. С. 89–94.

9. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Жаркова Н.А., Будуева В.Г., Опарина И.Б. Кинетика накопления повреждений в низкоуглеродистой стали при растяжении // Деформация и разрушение. 2005. №3. С.2–8.

10. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Жаркова Н.А., Тютин М.Р., Будуева В.Г. Акустические свойства малоуглеродистой стали на различных стадиях разрушения // Деформация и разрушение материалов. 2005. №4. С. 35–41.

11. Попова И.А., Гриднев А.Е., Кукуев В.И., Тутов Е.А., Мельникова М.С. Применение фрактального подхода к описанию микроструктуры поверхности анодных оксидов тантала // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2011. № 2. С.27–31.

Поступила в редакцию 08.11.2016

УДК 621.762.5:621.793.1

Повышение эксплуатационных характеристик твердосплавных алмазосодержащих композитов при диффузионной металлизации алмазной компоненты в процессе спекания с пропиткой. І. Обоснование эффективности гибридной технологии синтеза

П.П. Шарин^{*}, С.П. Яковлева^{*}, Г.Г. Винокуров^{*}, В.И. Попов^{**}

^{*}Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск **Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Для повышения химической и механической адгезии частиц природного алмаза с твердосплавной матрицей при синтезе алмазно-абразивных композитов предложена гибридная технология, совмещающая в одном технологическом цикле термодиффузионную металлизацию алмаза и спекание по разработанной схеме самодозируемой пропитки. Технология исключает повторный нагрев металли-

ШАРИН Петр Петрович – к.ф.-м.н., в.н.с., psharin1960@mail.ru; ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав.отд., spyakovleva@yandex.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с., g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru; ПОПОВ Василий Иванович – к.ф.-м.н., с.н.с., volts@mail.ru.