

## КОРРЕЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИХ СТРУКТУРЫ

Доктор технических наук *Р.С. Ахметханов*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

*Рассмотрен вопрос о корреляции между механическими свойствами материалов и фрактальными оценками геометрических характеристик их структуры. Приведены примеры, исследованы изображения микрошлифов при нагрузочных испытаниях и получено, что при увеличении микротрещин на поверхности образца фрактальная размерность увеличивается.*

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, механические свойства, микрошлиф, структура, фазы, размер зерен, фрактальная размерность, монофрактал, мультифрактал.

## CORRELATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS WITH FRACTAL DIMENSION IMAGE OF THEIR STRUCTURE

Dr. (Tech) *R.S. Akhmetkhanov*  
Federal state budgetary institution of science  
Institute of machines science named. A. A. Blagonravova of the RAS

*The article discusses the issue of correlation between the mechanical properties of materials and fractal estimates of the geometric characteristics of their structure. Examples are given, images of microsections during stress tests are investigated, and it is found that with an increase in microcracks on the surface of the sample, the fractal dimension increases.*

**Keywords:** construction materials, mechanical properties, microsection, structure, phases, grain size, fractal dimension, monofractal, multifractal.

Безопасность технических систем зависит от многих факторов. Одним из них является механическая прочность материалов – способность выдерживать функциональные нагрузки с заданным запасом по прочности. При этом создание новых материалов с заданными повышенными механическими свойствами и определение связи между строением (структурой) вещества и его физико-механическими свойствами являются одними из важнейших задач.

На практике одни свойства материалов являются структурно-чувствительными, а другие — структурно-нечувствительными. Примером нечувствительной к структуре материала характеристики является модуль упругости, который слабо зависит от размера или состава зерен в материале. И существует представление, что модуль упругости стали не зависит от ее состава. А изменение модуля упругости при изменении температуры превышает влияние химического состава, размера зерен или степени холодной вытяжки. Другими подобными примерами являются коэффициент теплового расширения и удельный вес (плотность) материала.

В отличие от перечисленных выше характеристик, предел текучести, определяемый как максимальное напряжение при начале пластического течения материала, весьма чувствителен к изменению микроструктурных параметров. Предел текучести зависит от размера зерен, плотности дислокаций и объемной доли частиц второй фазы. Теплопроводность и электропроводность материала также являются структурно-чувствительными характеристиками.

Наиболее ярким примером структурно-чувствительной характеристики материалов является вязкость разрушения, которая определяет способность материала противостоять распространению трещины [1]. Классическим примером структурно-чувствительной характеристики является предел текучести металла, описываемый уравнением Петча.

В настоящее время понятие структуры детализируют, деля его на четыре масштабных уровня, называемые макроструктурой, мезоструктурой, микроструктурой и наноструктурой.

Термин «структура» (микроструктура) используется для обозначения особенностей материала, обнаруживаемых каким-либо методом исследования. Описание микроструктуры состоит в идентификации фаз, определении их морфологии и химического состава. Описание структуры может быть как качественным, так и количественным. Существуют три способа описания микроструктуры материала. Во-первых, кристаллографические методы описания структуры. Во-вторых, морфология материала (размер, форма и распределение частиц и кристаллических зерен в пространстве). И, в-третьих, методы микроанализа химического состава [1].

Для качественного и количественного структурных свойств материалов применяется и компьютерные методы обработки информации. А одним из развивающихся направлений в цифровой обработке изображений является фрактальный анализ. Развитию этого направления способствует тот факт, что большинство изображений в некоторой степени можно считать фракталом или мультифракталом. Поэтому, любое изображение обладает свойствами и характеристиками фрактальных объектов, в том числе инвариантностью к масштабу рассмотрения и повороту.

Теория фракталов и мультифракталов в настоящее время широко используется для описания свойств самоподобия и сложных масштабных свойств (скейлинга), наблюдаемых в самых разных физических ситуациях. Понятие фракталов и мультифрактального формализма, развитые в работах зарубежных исследователей и отечественных исследователей утвердили основы фрактального анализа и в материаловедении.

Для композиционных материалов с квазивязким разрушением в работе [2] было получено выражение, связывающее фрактальную размерность  $D$  с коэффициентом Пуассона

$$D = \frac{2(1 + 4\nu)}{1 + 2\nu}.$$

При  $\nu = 0,5$  величина  $D = 2$  соответствует гладкой поверхности (линейный процесс разрушения).

Одна из зависимостей, удовлетворительно описывающих связь между пределом текучести  $\sigma_S$  и параметром структуры деформируемого материала, есть эмпирическое соотношение Холла – Петча [3]

$$\sigma_S = \sigma_0 + k_f d_m^{-0.5}, \quad (1)$$

где  $d_m$  – средний размер зерна. Постоянные  $\sigma_0$  и  $k_f$  имеют различные трактовки. В указанной выше работе полагают, что  $\sigma_0$  – предел макроупругости (минимальное напряжение, при котором внутри изолированных (наиболее мягких или наиболее «слабых») зерен

начинается микропластическая деформация);  $k_f$  – эмпирический коэффициент (постоянная Холла – Петча), характеризующий вклад границ зерен в упрочнение. Как правило, теоретическое определение  $k_f$  дается в рамках многочисленных и разнообразных дислокационных моделей.

Соотношение (закон) Холла-Петча (1) даёт количественное описание роста предела текучести поликристаллического материала с уменьшением размера зерна. В основе этой зависимости лежат дислокационные механизмы пластической деформации: границы зёрен тормозят движение дислокаций. Как отмечено в данной работе, кроме поликристаллических материалов, данное соотношение применимо также для некоторых слоистых материалов.

В работе [4] для описания структуры и свойств полимерных нано-композитов на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ЭД-20+УДА, ЭД-20+УДАГ, ЭД-20+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и нано-частиц различной природы предложено использовать принципы фрактально-кластерного подхода. В данной статье установлена корреляция фрактальной размерности нано-композита с его механическими свойствами: ударной вязкостью, тангенсом угла механических потерь, динамическим модулем упругости, временной прочностью при сжатии.

В следующей работе [5] приведен исследования взаимосвязи фрактальной размерности поверхности объекта с ее свойствами и его функциональными параметрами. В результате проведенного анализа составлена табл. 1, описывающая характер этой взаимосвязи.

Таблица 1

**Зависимость параметров материала от фрактальной размерности  $D$**

Свойство поверхности	Характер зависимости от параметра $D$
Коэффициент трения	При уменьшении фрактальной размерности $D$ значение коэффициента трения увеличивается
Ударная вязкость	С повышением фрактальной размерности $D$ значение ударная вязкость уменьшается
Динамический модуль упругости	С повышением фрактальной размерности $D$ значение модуль упругости увеличивается
Степень (скорость) растравливания	При уменьшении фрактальной размерности $D$ значение происходит снижение скорости травления поверхности при обработке ее методами размерной электрохимической обработки (ЭХО)
Коррозионная стойкость	С повышением фрактальной размерности $D$ обработанной поверхности значение коррозионная стойкость снижается
Долговечность	С повышением фрактальной размерности $D$ долговечность увеличивается
Качество поверхности	С повышением фрактальной размерности $D$ значения характеристик микронеровности рельефа $R_a$ и $R_z$ повышается

В работе [6] исследована возможность применение фрактальной теории для изучения структурной неоднородности композиционного материала на основе терморасширенного графита (ТРГ). ТРГ является слоистым материалом со сложной структурой. Данный материал получается путем термообработки при температуре 900-1500 °С интеркалированных частиц графита. Интеркалированные частицы – это соединение внедрения графита,

получаемое внедрением в межслоевое пространство кристаллической решетки графита молекул и ионов определенных веществ (интеркалантов), иногда в присутствии активаторов (как правило, окислителей).

Была получена оценка фрактальной размерности и мультифрактальные характеристики этого композиционного материала, установлена связь упорядоченности структуры от модуля упругости, определены зависимости микротвердости исследуемого материала от упорядоченности и однородности его структуры.

В статье сделан следующий вывод: по упорядоченности и однородности структуры материала можно определить состав этого материала и его механические свойства.

На основе фрактального анализа порошковых систем [7] получена зависимость фрактальной размерности от истинной плотности материала их частиц. С позиций современных представлений о химических связях обоснован характер изменения фрактальной размерности металлических и неметаллических дисперсных систем в зависимости от плотности частиц твердой фазы. Показано, что повышение степени ковалентности химической связи приводит к уменьшению фрактальной размерности порошков гомо-ядерных соединений, а фрактальная размерность дисперсных систем из гетероядерных неметаллических соединений растет с увеличением степени ионности их химической связи.

Дано объяснение зависимости фрактальной размерности от истинной плотности частиц сыпучих материалов. Авторы отмечают, что закономерности, полученные в ходе этой работы, могут быть использованы при разработке композиционных порошковых материалов с заранее заданными свойствами, при выборе оптимального количества вводимых модифицирующих добавок и наполнителей. Кроме того, они могут быть положены в основу создания новых экспресс-методов контроля физико-механических свойств и структурных характеристик пористых материалов.

В работе [8] приведены результаты отработки режимов получения исходной заготовки лопаток из титанового сплава ВТ6, которые включали изотермическое равно-канальное угловое прессование (РКУП). Выбор температурного интервала проведения штамповки основывался на исследовании термостабильности ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния, при котором выявили, что до температуры 800 – 820 °С рост зерен незначителен и однороден. При проведении исследований выбрали две температуры – 650 °С, т. е. верхний предел, при котором рост зерен еще не наблюдается, и 810 °С, когда рост зерен незначителен. Экспериментальные работы показали, что снижение температуры штамповки с 950 °С до 810 °С на серийно используемой оснастке обеспечивает полное заполнение гравюры штампа при использовании максимально возможных (в 1,6 раза больше серийных) силах деформирования и отсутствии заметного роста структурных составляющих. При температуре 650 °С и той же силе штамповки полного заполнения гравюры штампа не происходит.

Анализ полученных данных показывает, что использование выше представленной технологической цепочки при получении заготовок лопаток из сплава ВТ6 позволяет увеличить их предел прочности с 1000 МПа (серийная технология) до значений 1240 – 1280 МПа (новая технология) при сохранении пластичности на уровне серийных свойств (табл. 2). Состояние сплава при новой технологии - нано-структура (НС), размер структурных элементов которой приблизительно 0,5 мкм.

На рис. 1 приведены изображения микрошлифов образцов полученных различными технологиями и их обработанные изображения методом Собеля с целью выделения структуры изображения. Анализ изображений микрошлифов показал, что фрактальные размеры соответствуют следующим значениям:  $D=2,64$  (серийная технология) и  $D=2,84$  (предлагаемая технология)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Фрактальная размерность изображений может определяться в следующих границах:  $1 < D < 2$  и  $2 < D < 3$  в зависимости от рассмотрения плоского изображения микрошлифа или представляя его в трехмерном виде (уровень окрашенности пикселей изображения).

Таблица 2

**Механические свойства заготовки лопатки ГТД в НС состоянии**

Технология	Структурное состояние	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\Delta$ , %	$\delta_p$ , %
Серийная	Крупнозернистая структура (КЗ)	1030±18	920±21	≥8	≥2
Новая	Нано-структура (НС)	1260±20	1180±22	≥8	≥2

Таблица 3

**Структурные характеристики материала**

Параметры микрошлифа	Технологии	
	Серийная	Новая
Число зёрен:	816	945
Средняя площадь зерна, отн. ед. изм <sup>2</sup>	9,866	8,190
Средний размер зерна, отн. ед. изм.	1,697	1,559
Фрактальная размерность изображения, D	2,64	2,84

В табл. 3 приведены число зерен, их средний размер и средняя площадь (в относительных величинах).

Показано, что УЗМ состояние материала приводит к увеличению величины  $\sigma_b$  с использованием новой технологии, при этом мы видим рост фрактальной размерности изображения. Повышение фрактальной размерности означает, что структура материала стало более мелкозернистой.

Также существует корреляция прочности с фрактальными характеристиками структуры материала при усталостной долговечности. В этом случае при увеличении числа циклов нагружения  $N$  фрактальная размерность также меняется.

Для анализа корреляции между усталостной долговечностью и фрактальной размерности приведем результаты анализа серий микрошлифов полученных при исследовании стали 12ГС (сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций) при циклических нагрузочных испытаниях на растяжение. Микроструктура стали 12ГС в основном состоит из двух фаз - феррита и перлита. На изображении микрошлифа (см. рис. 2) светлые зоны – это феррит, тёмные включения – перлит (мелкодисперсная смесь феррита и цемента). Структура материала зернистая, крупные зерна феррита и мелкие зерна перлита.

При исследовании микрошлифов его изображение может быть представлено в различном виде – выделены фазы, границы, остов и т.п. На рис. 3 приведено изображение распределения зерен феррита (рис. 3а) и перлита (рис. 3б) и границы между ними (рис. 3в).

При исследовании изменений значений фрактальной размерности производились вычисления непосредственно фрактальной размерности  $D$  (использовалась бесплатная программа ImageJ).

Для проведенного испытания образца с предельным числом циклов нагружений  $N=95000$  кроме фрактальной размерности были вычислены и другие характеристики изображения микрошлифов. С накоплением повреждений количество сегментов  $n_z$  в изображении (зерен) увеличивается от 105 до 165 (табл. 4), при этом характеристики площади  $S_p$  и периметра этих сегментов  $P$  уменьшаются, т.е. происходит разрушение зерен.

Структура изображения становится более равномерной. Это зафиксировано на изображении остова (рис. 4б). Визуально видно, что перед разрушением металла структура линий остова изображения более изрезанная. Этим изображениям остова соответствуют фрактальные размерности  $D_0=1,208$  и  $D_{95000}=1,253$ . В этом случае также увеличение показателя фрактальной размерности свидетельствует о том, что структура материала претерпела значительные изменения – наличие появления микро-разрушений.

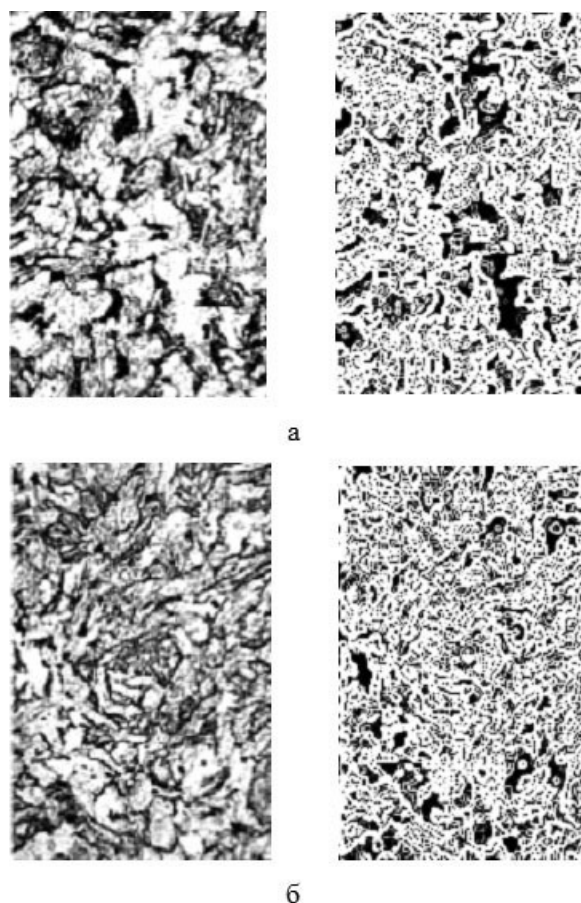


Рис. 1. Изображения микрошлифов (изображение слева) и структур изображений шлифа после процедуры Собеля (контрастное выделение границ структурных элементов) (изображение справа) материалов полученных разными технологиями: серийная (а); предлагаемая (б)

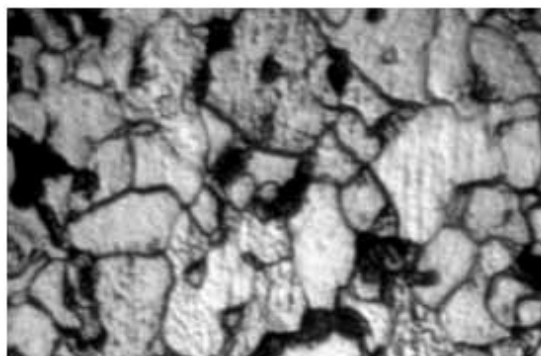


Рис. 2. Изображение микрошлифа стали 12ГС

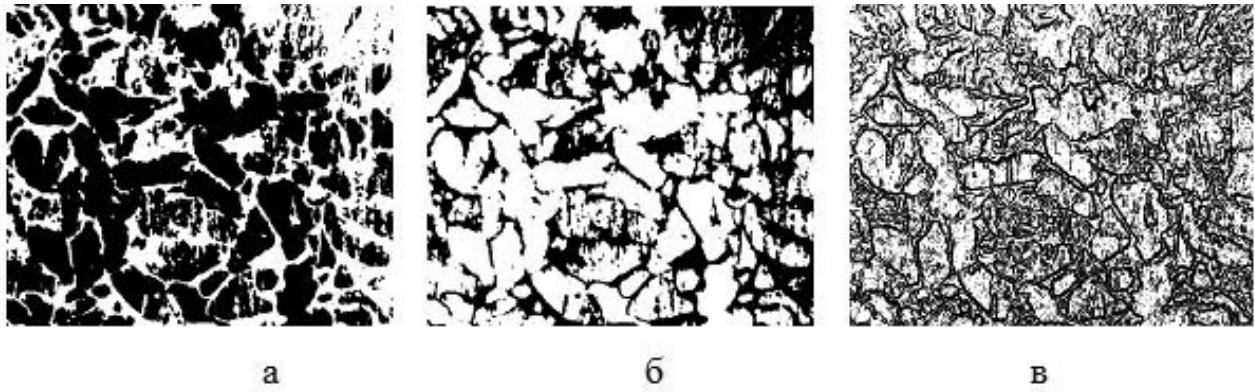


Рис. 3. Изображение распределения зерен феррита(а) и перлита (б) фазы и границы между ними (в)

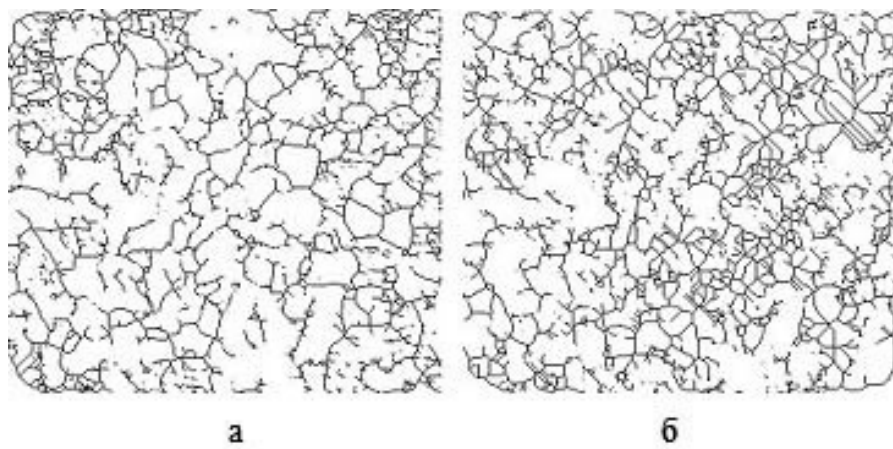


Рис. 4. Остов изображения микрошлифа при нагрузках  $N=0$ (а) и  $N=95000$  (б)

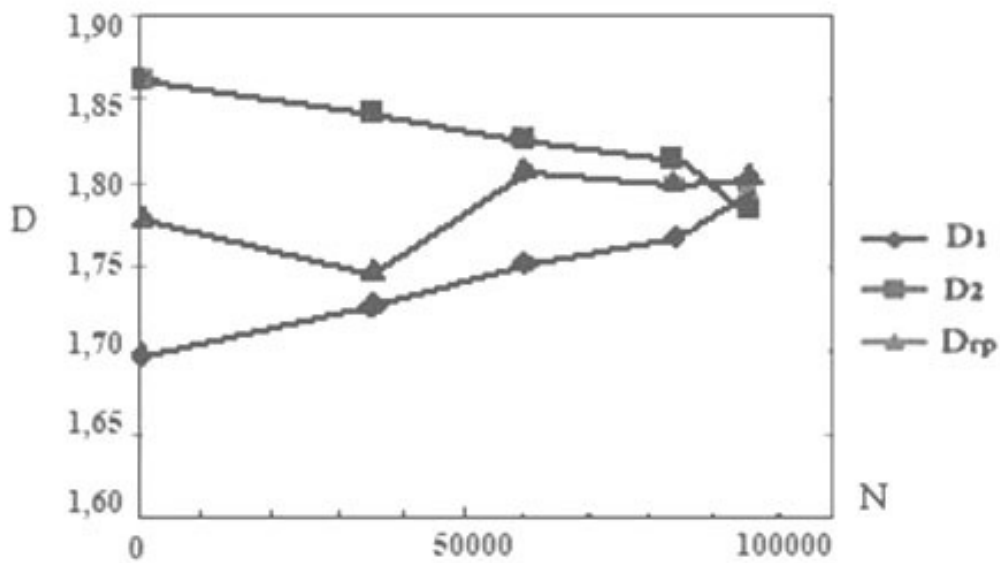


Рис. 5. Изменение фрактальной размерности геометрических характеристик фаз ( $D_1$  и  $D_2$ ) и границ  $D_{тр}$

**Изменение характеристик фрактальной размерности и зернистости микрошлифа  
в зависимости от числа циклов нагружений N**

Число циклов нагружения N	Число сегментов (зерен), $n_z$	Фрактальная размерность, $D_1$ (феррит)	Фрактальная размерность, $D_2$ (перлит)	Фрактальная размерность границ зерен, $D_{гр}$
0	105	1,698	1,861	1,781
38000	106	1,729	1,842	1,749
61000	137	1,754	1,827	1,810
84000	153	1,770	1,815	1,803
95000	165	1,802	1,784	1,795

На рис. 5 представлены графики изменения фрактальной размерности для фаз ( $D_1$  и  $D_2$ ) и границ зерен ( $D_{гр}$ ).

Увеличение фрактальной размерности  $D_1$  при увеличении числа циклов нагружений  $N$  образца говорит о том, что в материале появились микротрещины (повреждения) – происходит в первую очередь разрушение зерен феррита. Изменения фрактальных размерностей  $D_1$  и  $D_2$  происходит в обратной пропорции. К приближению момента разрушения образца фрактальные размерности стали близки по численным значениям.

До 38000 циклов нагружения изображение микрошлифа почти не меняется (количество сегментов (зерен) не меняется). Наиболее интенсивное увеличение микротрещин и их рост идет в промежутке от 38000 до 65000 циклов нагружения, далее происходит накопление повреждений с некоторым уменьшением скорости и после 84000 циклов нагружения скорость накопления повреждений увеличивается.

В работе [5] показано, что с увеличением фрактальной размерности структуры материала долговечность увеличивается, то при нагружении образцов при выходе микро и макротрещин на поверхность материала изменение фрактальной размерности изображения микрошлифа является первым визуальным признаком предстоящего разрушения образца. При этом процесс накопления повреждений в образце можно охарактеризовать общим состоянием поверхности образца (микрошлифа).

Еще следует отметить следующее. В теории фракталов объекты и процессы классифицируются на два основных класса - монофракталы и мультифракталы. Они отличаются тем, сколько масштабных элементов присутствует в объекте или в процессе и какие из них доминируют. Если монофракталы характеризуются фрактальной размерностью, то мультифракталы характеризуются мультифрактальным спектром, который может содержать бесконечное число фрактальных размерностей  $D_i$  ( $i = -\infty, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty$ ), характеризующих присутствие структурных элементов различного масштаба. Например, в работе [9] на основе методов мультифрактального формализма построен алгоритм оценки фрактальных характеристик структур материалов. Получены фрактальные характеристики микроструктуры различных материалов.

В данной статье отмечается, что среди основных характеристик, используемых для сравнения и описания мультифракталов, можно выделить хаусдорфову размерность  $D_0$ , несущую грубую обобщенную информацию о размерности пространства, в которой сформирован мультифрактал, и его несплошности в целом. И показательной величиной является и информационная размерность  $D_1$ , определяемая вероятностью найти необходимую точку в пределах заданной ячейки и характеризующая энтропию фрактального множества, или неоднородность распределения элементов мультифрактала в пространст-



ве. Еще одной существенной характеристикой мультифрактала служит корреляционная размерность  $D_2$ , задаваемая вероятностью нахождения двух точек на определенном расстоянии друг от друга, то есть характеризующая неоднородность распределения элементов мультифрактала в пределах фрактального множества. Эти все фрактальные размерности хорошо характеризуют структуры материала и подходят для оценки их структурных отличий и зависимость механических характеристик от фрактальных размерностей (мультифрактального спектра). В работе также отмечается, что с ростом фрактальных размерностей структуры материала увеличиваются и значения их прочностных характеристик. Образцы с более высокой фрактальной размерностью более близки к монолитным, чем образцы с более низкой размерностью. Отмечается, что наиболее сильно проявляется корреляция механических характеристик с размерностью  $D_{-1}$ .

Исследования микрошлифов стали 12ГС при нагрузочных испытаниях на усталость показали, что мультифрактальный спектр перед разрушением образца становился монофрактальным - структура изображения микрошлифа перед разрушением характеризуется одной величиной фрактальной размерности  $D_0$ .

Таким образом, в статье была показана возможность оценки механических параметров конструктивных материалов от величины фрактальной размерности при нагрузочных испытаниях или в процессе их эксплуатации. Это позволяет использовать методы теории фракталов (монофрактальные и мультифрактальные) при исследовании механических свойств материалов, при диагностике технических систем и т.д.

Также фрактальные закономерности, связывающие механические характеристики конструкционных материалов с изображениями их структуры, могут быть использованы при разработке новых материалов с заранее заданными свойствами, при выборе оптимального количества добавок и наполнителей (композиционные материалы). Кроме того, они могут быть положены в основу создания новых экспресс методов контроля физико-механических свойств, зависящих от структурных характеристик конструкционных материалов.

## Литература

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля Москва: Техносфера. - 2004. - 384с.
2. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/32760/05%20-%20Dyrda.pdf?sequence=1> (дата ознакомления 25.12.2017)
3. <http://science.spb.ru/files/IzvetiyaTI/2013/21/articles/09/files/assets/common/downloads/publication.pdf> (дата ознакомления 25.12.2017)
4. Ананьева Е.С., Новиковский Е.А., Ананьев М.И., Маркин В.Б., Ишков А.В. Применение фрактально-кластерного подхода для анализа структуры и прогнозирования свойств полимерных нанокомпозитов//Ползуновский вестник 1/1. - 2012. С. 10-14
5. Бовыкин О.Б. Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности // Известия «МАМИ», №1(15), т.2. - 2013. С.14-18
6. Стряпунина К.А., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Сиротенко Л.Д. Мультифрактальный анализ композиционного материала на основе терморасширенного графита //Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, № 1(2). - 2014. С. 551-556
7. Мордасов М.Д., Фирсова А.В., Мордасов Д.М. Влияние истинной плотности частиц порошковых систем на их фрактальную размерность. Материаловедение. Нанотехнологии. Вестник ТГТУ. Том 23, № 2. - 2017. С.348-354
8. Рудской А.И. Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлов: учеб. пособие / А. И. Рудской, Г. Е. Коджаспиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. - 2012. – 247 с.

9. Красикова И.Е., Красиков И.В., Картузов В.В. Корреляция значений фрактальных характеристик структуры материала по электронно-микроскопическим фотографиям поверхности образцов со значениями их физико-механических характеристик (<http://www.materials.kiev.ua/publications/EMMM/2016/2.pdf>) (Дата обращения 20.03.2020)

### Сведения об авторе

*Ахметханов Расим Султанович*, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, т. 8(495)623-57-55, e-mail: mibsts@mail.ru

УДК 531.8

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-05-3

## МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Д.О. Резников*

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

*Представлена матричная многоуровневая модель описания процессов распространения аварии в сложных технических системах, включающая четыре масштабно-структурных уровня: уровень конструкционного материала; уровень отдельных элементов системы; системный уровень и уровень внешней среды, окружающей систему и разработка системы оценки рисков. Разработанная модель позволяет оценивать не только так называемые прямые риски, которые учитывают прямые экономические последствия аварий в системе без учета ущербов окружающей техногенной среде, но также и косвенные риски, связанные с вторичными отказами в окружающей среде, которые инициируются аварией в системе*

**Ключевые слова:** угроза, уязвимость, ущерб, риск.

## MULTILEVEL MODELS FOR ASSESSMENT IF RISKS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

*D.O. Reznikov*

Institute of Machine Sciences of the RAS

*The paper present samul tilevel matrix model for describing the process of accident propagation that includes four scale-structural levels: the level of structural material, the level of technical components, the systemic level and the level of the external environment. The models allows assessing not only the so-called direct risks that take into account the expected monetary*