УДК 539.3

Б.Н. ПЕНТЮК, канд. техн. наук, ВНТУ (г. Винница),
Ю.В. ЧОВНЮК, канд. техн. наук, КНУСиА (г. Киев),
О.М. ШУТОВСКИЙ, канд. физ.- мат. наук, КНУСиА (г. Киев)

ФРАКТАЛЬНО-СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУР ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ИХ УДАРНО-ВИБРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ

Запропонований фрактально-синергетичний аналіз еволюції та топологічної самоорганізації структур порошкових матеріалів у процесах їх ударно-вібраційного пресування.

The fractal-synergetic analysis of evolution and topological self-organization of powder materials’ structures during their impact-vibration pressing is proposed.

1. Введение

Развитие мезомеханики порошковых материалов (ПМ) в процессах их ударно-вибрационного прессования тесно увязано с подходами синергетики и фрактальной геометрии. Это не является случайным, так как использование принципов синергетики [1] и теории фракталов [2] позволяет устанавливать связь между процессами, протекающими на различных масштабных уровнях ПМ (микро-, мезо-, макро-). Именно эту задачу призвана решить и мезомеханика ПМ. Как показано В.Е. Паниным с соавторами [3], использование мезоуровня рассмотрения позволяет наиболее полно изучать механизмы пластической деформации в ПМ, разрушения, взаимодействие и распад мезоскопических структур, а также их устойчивость. Как известно, линейная механика разрушения (ПМ) рассматривает только заключительный этап эволюции системы – разрушение. Физическая мезомеханика структурно-неоднородных сред (к ним относится ПМ) [4] акцентирует свое внимание на кооперативном взаимодействии процессов пластической деформации и разрушения на различных масштабных уровнях с введением адекватного для каждого уровня математического аппарата. Было показано [3, 4], что пластическое течение происходит одновременно на нескольких уровнях, причем трансляция на одном уровне обязательно сопровождается поворотом на более высоком уровне и наоборот. Авторы [3, 4] одними из первых создали волновую модель, провели расчеты и осуществили эксперименты, доказавшие вихревой характер пластической деформации. Количественный анализ структур деформации (в ПМ) требует применения подходов фрактальной геометрии.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи между процессами самоорганизации фрактальных структур в ПМ (при их ударно-вибрационном прессовании) на различных масштабных уровнях со свойствами самих материалов на основе использования концепции детерминированного хаоса [1] и информации преобразования [5].

2. Универсальные свойства хаотических систем

В последние годы большое внимание уделяется анализу закономерностей хаотического поведения нелинейных динамических систем. В отличие от равновесных, периодических или квазипериодических систем, поведение которых характеризуют аттракторами типа устойчивый фокус, тор или предельный цикл, хаотическое движение характеризуется хаотическим аттрактором, названным поэтому «странным». (**Аттракторами** называют конечные точки или области, к которым «притягивается» система на фазовой плоскости при затухании движения или потере устойчивости).

Согласно [6] фундаментальным свойством нелинейных систем является периодическое чередование эволюции и инволюции, что сопровождается трансформацией структуры (ПМ). Процесс **топологической организации структур (ПМ)** в единую эволюционирующую структуру управляется принципом минимума производства энтропии. При исчерпании возможности перестройки структуры (ПМ) достигается момент обострения максимального развития [7, 8]. Периодическая перестройка нелинейной динамической системы при ее эволюции носит универсальный характер [1]. Универсальность заключается в том, что имеется определенный диапазон значений внешнего параметра, в котором поведение системы упорядочено и периодично [2, 9]. Периодичность означает циклическое поведение системы (ПМ) и самовоспроизводимость ее поведения в каждый период времени T. Вне этого диапазона поведение не воспроизводится. Фейгенбаум [9] показал, что критерием воспроизводимости процесса является удвоение периода. Процесс последовательного удвоения периода от цикла к циклу отвечает последовательности $T \rightarrow 2T \rightarrow 4T \rightarrow ...$ Системы, испытывающие удвоение периода, характеризуются универсальным числом Фейгенбаума $\delta = 4{,}6692...$, определяющим переход к хаотическому движению. Аналитически переход от одного цикла повторения процесса к другому в системе с обратной связью описывается итерационной функцией, отвечающей нелинейной зависимости между результатом X_{n+1} и начальным значением X_n. Хакен [1] для описания процессов удвоения периода с помощью дискретного отображения Пуанкаре использовал параболическую зависимость X_{n+1} от X_n, для которой итерационная функция имеет вид:

$$X_{n+1} = \lambda \cdot X_n \cdot (1 - X_n). \qquad (1)$$

Численное моделирование удвоения периода в соответствии с соотношением (1) показало, что предельный цикл, отвечающий $\lambda = \lambda_\infty = \delta = 4{,}6692...$ Использование итерационных функций для описания эволюции такой структуры по сценарию удвоения периода на пути к хаосу оказалось эффективным при анализе фрактальных структур (ПМ). Для сложных физических систем (типа ПМ) самоподобие структур реализуется на ограниченных масштабах. В таких случаях используют представления о мультифракталах [2]. Для их описания введены представления о фрактальной мере в виде взаимосвязанных подмножеств с показателями, изменяющимися по степенному закону. Это означает, что мультифрактальное множество однородно и содержит подмножества с различной фрактальной размерностью [10]. Для описания эволюции системы (ПМ при его ударно-вибрационном прессовании), испытывающей удвоение периода на пути к хаосу, удобно использовать итерационную функцию вида [11, 12]:

$$\frac{X_n^{\;*}}{X_{n+1}^{\;*}} = \Delta^{1/m}, \qquad (2)$$

где Δ – постоянная, контролирующая переход от одного цикла удвоения периода к другому; m – переменная, изменяющаяся по закону геометрической прогрессии $m = 1,2,4,8,...$; $X_n^{\;*}$ и $X_{n+1}^{\;*}$ – пороговые значения переменной в точках перехода (в ПМ) от одного цикла удвоения периода к другому.

Как показывает анализ, при использовании функции самоподобия (2) переход на 2^{∞} бесконечную орбиту по критерию Фейгенбаума отвечает переходу от упорядоченного движения к хаотическому при $m = 8$. При этом устойчивость движения на всех орбитах контролируется постоянной $\Delta = \Delta_4$, равной одному из значений обратной величины корня обобщенной золотой пропорции $\Delta_4 = 0{,}324$ [13]. Это подтверждает парадигму, связанную с утверждением о контролирующей роли золотой пропорции и ее производных в устойчивости структуры живой и косной природы [14 – 18], если учесть спектр значений Δ_i.

Полученные данные позволяют трактовать универсальное число Фейгенбаума как постоянную, связанную с золотой пропорцией.

3. Упорядоченная самоорганизация фрактальных дислокационных структур в ПМ (в процессе их ударно-вибрационного прессования)

Теория фракталов позволяет ввести в качестве количественного показателя дислокационной структуры ПМ фрактальную размерность и использовать ее для оптимизации дислокационных структур (в ПМ) с целью придания ПМ (например, из металлов и сплавов) структур, оптимально сочетающих свойства прочности и пластичности. Пластичность является диссипативным явлением, так как связана с производством дислокаций. Внутренняя диссипация, т.е. производство энтропии, приводит к необратимости и гистерезису. Процесс носит стохастический характер. В этой связи используемый до настоящего времени показатель дислокационной структуры – плотность дислокаций – не является достаточным, так как не учитывает степень неоднородности структуры (ПМ). Эту задачу успешно решает фрактальная параметризация дислокационных структур. Известно, что ступеньки скольжения, возникающие на поверхности деформируемого металлического ПМ, характеризуются иерархическим строением и фрактальной размерностью [19]. Для оптимизации дислокационных структур в ПМ с позиции фрактально-синергетического подхода важным является установление критических параметров, отвечающих стадии детерминированного хаоса. Это позволяет описывать эволюцию системы (структуры ПМ в процессе его ударно-вибрационного прессования) с использованием небольшого числа переменных. Рассмотренный в предыдущем разделе динамический подход, являющийся универсальным, позволяет устанавливать связь параметров дислокационной структуры ПМ с управляющим параметром и выделять стадию детерминированной самоорганизации дислокационных структур ПМ. При исследовании динамической самоорганизации дислокационных структур ПМ эффективно использовать методы, основанные на синтезе и анализе уравнений кинетического и динамического баланса, а также методы численного моделирования с использованием подходов молекулярной динамики и метода клеточных автоматов [19]. В моделях клеточных автоматов пространство-время дискретизируются и строится двумерное поле, состоящее из совокупности ячеек и узлов. Каждая ячейка имеет ограниченное число возможных состояний, причем используется принцип итерации, когда состояние на следующем временном шаге зависит только от состояния на предыдущем шаге. На каждом шаге имитируется возбуждение всей популяции, при этом временной масштаб равен интервалу между двумя последовательными итерациями. Метод позволяет решать задачи о радиусе экранирования упругих взаимодействий в металлических ПМ, образования дислокационных стенок при растяжении, распределения сдвига и пр. Сделан вывод, что на стадии легкого скольжения собственно дислокациям не свойственна тенденция образовывать периодические структуры, и вопрос о моделировании образования ячеистых структур долгое время остается открытым. Моделирование конфигурации краевых дислокаций при постоянных приложенных напряжениях показало, что структуры стенок металлических ПМ появляются после 600, 800, 900 и 1100 шагов. При моделировании была рассмотрена динамическая ситуация, при которой краевые дислокации перераспределяются под действием постоянно действующего в ПМ напряжения в направлении скольжения. Эта ситуация характеризует условия ползучести, для которых характерно образование полигональных стенок краевых дислокаций в металлических ПМ. Модель учитывает образование первоначально нерегулярных структур ПМ, которые эволюционируют под действием нескольких конкурирующих механизмов. Подвижные дислокации в ПМ устанавливаются стенками по закону роста классических наклонных субграниц. Эти субграницы при достижении верхних и нижних границ поля становятся взаимосвязанными за счет периодических граничных условий, что способствует повышению устойчивости конфигурации в ПМ. Условию равновесия отвечает минимум общей упругой энергии взаимодействия. Наш анализ показывает, что в этом случае значения шагов 600, 800 и 900 отвечает детерминированной самоорганизации дислокационных стенок в ПМ, так как отношение предыдущего и последующего шагов взаимосвязано функцией самоподобия (2):

$$600/800 = (\Delta_4)^{1/4};\ \ 800/900 = (\Delta_4)^{1/8} \qquad (3)$$

и отвечает сценарию удвоения периода. Анализ данных, полученных в [20], при моделировании эволюции дислокационных ячеистых структур в металлах и сплавах, и экспериментальных исследований показал, что закон детерминированного хаоса реализуется и при самоорганизации ячеистых структур.

Использование распределения Пуассона позволяет определять размер мезоструктур в металлических ПМ (в виде диаметра дислокационных ячеек), описываемых соотношением [20]:

$$d_я = \frac{d_я{}^{кр}}{P_a(¥^p)},\ \ ¥^p \geq ¥_я{}^p, \qquad (4)$$

где $d_я{}^{кр}$ – критический размер дислокационных ячеек в ПМ; $¥_я{}^p$ – величина пластической деформации, связанная с деформацией начала деформирования ячеистой структуры ПМ; $P_a(¥^p)$ – функция распределения Пуассона.

В таблице 1 приведены экспериментальные значения $d_я$ в зависимости от степени деформации ПМ, хорошо согласующиеся с данными моделирования. Наш анализ зависимости размера дислокационной ячейки ПМ от степени его деформации позволил установить, что переход от одной пороговой деформации ($£_n$) к другой ($£_{n+1}$) отвечает закону самоподобия:

$$£_n / £_{n+1} = (\Delta_4)^{1/m},\ \ m = 1,2,4,8. \qquad (5)$$

(Зависимость размера дислокационных ячеек $d_я$ от степени деформации £ при растяжении образца ПМ из чистого железа, спрессованного ударно-вибрационным методом, с выделенной стадией упорядоченной самоорганизации ячеек носит линейный характер. При уменьшении $d_я$ от 0,8 мкм до 0,2 мкм £,% линейно возрастает от 0 до 100%, соответственно. Эта зависимость согласуется с экспериментальными данными, полученными для чистого железа (не в виде ПМ) в [20]. Расчет по соотношению (2) дает: $d_1/d_2 = d_2/d_3 = (\Delta_4)^{-1/4} = const.$). Причем размер ячейки уменьшается на одну и ту же величину $(\Delta_4)^{1/4}$, равную 0,75. Хаос наблюдается в диапазоне изменения $d_я$ от 0,8 мкм до 0,4 мкм (при этом £,% изменяется от 0 до 40), а детерминированный хаос – при $d_я = 0{,}4...0{,}2$ мкм (£,% = 40...100).

Детерминированная самоорганизация мезоструктур деформации в ПМ выявляется также путем анализа микрорельефа поверхности деформируемых материалов.

Таблица 1

Значения среднего размера дислокационных ячеек $d_я$ для ПМ из чистого железа при различной степени деформации

	Эксперимент				
£,%	18	30	45	70	90
$d_я$, *мкм*	0,63	0,52	0,40	0,30	0,22
	Расчетный спектр				
£,%			40	67,5	90
$d_я$, *мкм*			0,40	0,29	0,22

В таблице 2 представлена зависимость фрактальной размерности структуры поверхности ПМ от степени деформации образца, изготовленного из указанного материала ударно-вибрационным способом прессования. Авторы [21, 22] исследовали дюралюминий Д16Т после активного растяжения с определением фрактальной размерности оптико-телевизионным методом [4]. Анализ этих и собственных экспериментальных данных (для ПМ из указанного материала) позволил выделить стадии детерминированного изменения фрактальной размерности ПМ, отвечающей условию:

$$\frac{£_n}{£_{n+1}} = \Delta_2{}^{1/m} \qquad (6)$$

($\Delta_2 = 0{,}465$ и $m = 2{,}4$ для точек 1-3 при $D_1/D_2 = 0{,}465$).

Таблица 2

Упорядоченное изменение фрактальной размерности D структуры поверхности образцов ПМ с ростом деформации £ для сплава Д16АТ на стадии детерминированного хаоса [21,22]

Порядок		Хаос	
D	£,%	D	£,%
2,00 <2,00…<2,02 2,02 <2,02…<2,04	0…2 <2…4 4…7 <7…8,3	2,04 <2,04…<2,06 2,06	<8,3…<11 11…<12,3 $\geq$ 12,3

Как уже отмечалось, в физических системах (типа ПМ) монофракталы обладают свойством самоподобия на ограниченных масштабах. В условиях нелинейной динамической самоорганизации более устойчивыми структурами в ПМ являются **мультифракталы** (взаимосвязанное множество фракталов). Они отражают самоорганизацию фрактальных структур ПМ в условиях динамического хаоса и периодическую их перестройку при достижении порога устойчивости.

Для извлечения максимальной информации об устойчивости мультифрактальных структур ПМ необходим фрактально-синергетический анализ эволюции системы в виде фрактальных кластеров ПМ, проведенный далее.

4. Анализ устойчивости мультифрактальных множеств в ПМ

Детерминированное поведение системы при динамическом хаосе (детерминированный хаос) предполагает наличие «информаторов», сигнализирующих системе о достигнутом пороге устойчивости. Такими информаторами в ПМ являются мультифрактальные множества. В данном случае речь идет о передаче информации в критических точках в момент достижения порога устойчивости мультифрактальной структурой ПМ. В точках неустойчивости системы проявление мультифракталами ПМ информационных свойств обусловлено сильным возбуждением среды ПМ, сопровождающимся возникновением нелинейных волн и вихрей при переходе от старой структуры прессуемого ПМ, потерявшей способность к устойчивой самоорганизации, к новой на другом пространственно-временном уровне [4].

В условиях динамической самоорганизации мультифрактальное множество ПМ сохраняет способность к упорядоченной эволюции до тех пор, пока связь между размерностью множества D_q и показателем массы $d = ²(q)$ определяется только одной переменной q, определяемой соотношением:

$$D_q = \frac{²_q}{q-1}. \qquad (7)$$

Для плоских фрактальных множеств в ПМ при $q = q^*$ и $D_q = D_{q^*}^{\min}$ достигается минимальная, а при $q = -q^*$ и $D = D_{-q^*}^{\max}$ (объемные множества) – максимальная плотность (масса) фрактальной среды ПМ. В развитых к настоящему времени методах мультифрактальной параметризации структур (ПМ) границы реализации экстремальных уровней плотности фрактальной среды (ПМ) при изменении q не были установлены. Вместе с тем, для практического использования мультифрактальной параметризации структур ПМ в материаловедении это крайне необходимо. Потеря способности мультифрактального множества к топологической самоорганизации структур ПМ в единую эволюционную структуру может происходить при достижении либо порога перколяции, либо порога упругости фрактальной среды (ПМ). Это позволяет представить границы устойчивости мультифрактальных множеств в

виде предельных кривых $D_q - q$ при достижении порога перколяции и порога упругости. Для плоских (квазиплоских) решеток спрессованного ПМ минимальный порог перколяции достигается при $D = 1{,}67$, т.е. значение $D_{q^*}^{c} = 1{,}67$. Что касается порога упругости ПМ, то физическими предпосылками для его определения могут быть следующие. Рыхлые фрактальные объекты при малых напряжениях могут переходить на больших пространственных масштабах к нелинейному упругому отклику системы и нарушению самоподобия [23]. Автор [24] показал, например, что самоподобие упругоизотропного кристалла при увеличении деформации сохраняется в том случае, если изменение геометрических размеров фрактала при упругой деформации подчиняется закону изменения плотности фрактала. С учетом зависимости плотности фрактала и его линейного размера для случая однородной деформации фрактала была получена связь между коэффициентом Пуассона $\neg$ и фрактальной размерностью d_f однородного фрактала в виде:

$$d_f = (d-1)\cdot(1+\neg), \qquad (8)$$

где d – евклидова размерность окружающего (ПМ) пространства. В соответствии с (8) критерием устойчивости плоских фрактальных множеств ПМ могут служить $D_{q^*}^{\min} = d_f = 1+\neg$ при $d = 2$, а для объемных $D_{q^*}^{\max} = d_f = 2\cdot(1+\neg)$ при $d = 3$.

С учетом того, что экстремальные значения коэффициента Пуассона для различных твердых сред (в т.ч. спрессованных ПМ) укладываются в интервал $0{,}3 \le \neg \le 0{,}475$, можно показать, что значение D_{-q^*} в случае объемных структур должно находиться в интервале $2{,}6 \le D_{-q^*} \le 2{,}95$, а в случае плоских – $1{,}475 \le D_{q^*} \le 1{,}67$. При этом в зависимости от типа мультифрактальной структуры ПМ и ее пространственно-временного уровня переменная q может изменяться в широких пределах от $q = -\infty$ до $q = +\infty$.

Основная методическая трудность связана с определением пороговых значений q^* и D_{q^*}, адекватно отражающих пределы устойчивости мультифрактальной структуры ПМ в изучаемых условиях. Она преодолевается путем выбора масштаба наблюдения и параметров дискретной аппроксимации исследуемых структур ПМ для ввода в ПЭВМ. Это позволяет управлять параметром q и достигать условия аппроксимации фрактальной структуры ПМ на данном пространственно-временном уровне, с определением значения $q = q^*$.

Холси и др. [25] показали, что для двухмасштабного множества Кантора $q = q^* = 40$. Для физических объектов пороговые значения D_{q^*}, отвечающие переходу от динамической упорядоченной самоорганизации к хаотической, контролируются $D_{-q^*}^{\max}, D_{q^*}^{\min}$ при достижении порога упругости (для объемных и плоских множеств соответственно) и $D_{-q^*}^{c}, D_{q^*}^{c}$ при достижении порога перколяции. Переходы от упорядочения к хаосу характеризуются слабой зависимостью D_q от q. В Таблице 3 выделены два блока пороговых значений, отвечающих $D_{-q}^{c} \le D_q \le D_{-q}^{\max}$ – для объемных множеств (блок I) и $D_q^{\min} \le D_q \le D_q^{c}$ – для плоских множеств (блок II). При $¬ = ¬_{\max} = 0{,}475$ блоку I отвечает интервал пороговых значений $2{,}67 \le D_q \le 2{,}95$, а блоку II - $1{,}475 \le D_q \le 1{,}67$.

Таблица 3

Точечная $D_q - q$ – диаграмма обобщенных размерностей Реньи с выделенными (квадраты) границами реализации мультифрактальных множеств в средах (типа ПМ), характеризуемых коэффициентами Пуассона: пороги упругости $D_{q^*}^{\min} = 1 + ¬$, $D_{-q^*}^{\max} = 2 \cdot (1 + ¬)$; пороги перколяции $D_{q^*}^{c} = 1{,}67$, $D_{-q^*}^{c} = 2{,}67$; 1, 2 – множества точек предельных $D_q - q$ – диаграмм для сред (ПМ), претерпевающих переход от упорядочения к хаосу при достижении порога упругости (1) или порога перколяции (2)

1:	$(D_{-q^*}^{\max}, -q^{*\min})(блок\ I) \Rightarrow (D_{-q^*}^{c}, -q_c) \Rightarrow (D_0, 0) \Rightarrow (D_1, 1) \Rightarrow (D_{q^*}^{c}, q_c) \Rightarrow (D_{q^*}^{\min}, q^{*\max})(блок\ II)$
2:	$(D_{-q^*}^{c}, -q^{*\min})(блок\ I) \Rightarrow (D_0, 0) \Rightarrow (D_{q^*}^{c}, q^{*\max})(блок\ II)$

Таким образом, мультифрактальная параметризация структур различной природы (в т.ч. спрессованных ударно-вибрационным методом ПМ) позволяет определять пороговые значения D_q, при достижении которых базовое множество становится геометрическим местом точек значений D_{q^*}, характеризующих предельное состояние устойчивости структур. Развитие представлений о базовых мультифрактальных множествах ПМ позволяет ввести, наряду с показателем $¢_q$, скрытой упорядоченности, также другие показатели упорядоченности и устойчивости мультифрактальных структур. Они представлены в таблице 4. Их использование позволяет решать важные задачи материаловедения (ПМ), связанные с оптимизацией фрактальных структур путем термомеханического воздействия (или легирования металлических ПМ), прогнозированием поведения подобных материалов при данных служебных условиях, диагностикой качества изделий и деградации структуры при эксплуатации и другие проблемы.

Таблица 4

Соотношения для расчета показателей упорядоченности и фрактальной структуры ПМ

Показатель	Обозначение	Соотношение
скрытой упорядоченности	$¢_c$	$¢_c = D_1 - D_{q^*}^{c}$
фрактальности	$¢_d$	$¢_d = D_{q^*}^{c} - D_{q^*}^{\min}$
способности к самоорганизации МФМ*	$¢_s$	$¢_s = D_1 - D_{q^*}^{\min}$

Примечание. * МФМ – мультифрактальное множество.

5. Связь инвариантных комплексов механических свойств ПМ с фрактальной размерностью структуры зоны их предразрушения

Ранее [11] был выделен комплекс базовых механических свойств, контролирующих неустойчивость зоны предразрушения при отрыве. К ним относятся: предел текучести материала $±_T$, характеризующий устойчивость системы к деформации (макроуровень); предельная плотность энергии упругой деформации [26] W_c (мезоуровень); критическая энергия на единицу длины трещины K_{1C} (макроуровень). Они образуют инвариантный комплекс $p_* = (K_{1C} \cdot ±_T)^2 / W_c$, связанный с комплексом упругих свойств материала $e_* = (1+¬)\cdot(1-2¬)/E\cdot(K_{1R})^2$ и фрактальной размерностью зоны предразрушения соотношением [11]:

$$\Delta_{\max}^{D_s} = \frac{(1+¬)\cdot(1-2¬)}{E\cdot(K_{1R}^{\max})^2}\cdot\frac{(K_{1C}\cdot ±_T)^2}{W_c}, \qquad (9)$$

где E – модуль упругости (ПМ); $K_{1R}^{\max}$ – размерная постоянная, контролирующая границы инвариантности к внешним факторам комплекса p_* в зоне предразрушения образца (из ПМ) отрывом; $¬$ – коэффициент Пуассона. Функцию самоподобия зоны предразрушения Δ^{D_s} можно представить также в виде:

$$\Delta^{D_s+M} = \frac{r_c^{\max}}{r_{0c}}, \qquad (10)$$

где r_{0c} – предельный размер зоны предразрушения (в ПМ) к моменту достижения порога упругости фрактальной среды (ПМ), а $r_c^{\max}$ – порога перколяции; M – постоянное число: $M = 1$ при реализации пластической нестабильности в образце (из ПМ), $M = 0$ при реализации в нем нестабильности разрушения. Отношение $r_c^{\max} / r_{0c} = i_r^c$ характеризует критическое число самоподобных фрактальных кластеров в зоне предразрушения (ПМ), достигших порога упругости при $r_c^{\max} = r_{0c}$. Значение r_{0c} может быть рассчитано на основе соотношения, предложенного Дж. Си [26],

$$r_{0c} = \frac{S_{1C}}{W_c} = \frac{K_{1C}{}^2 \cdot (1+¬) \cdot (1-2¬)}{2®EW_c}, \qquad (11)$$

где S_{1C} – коэффициент плотности энергии упругой деформации (ПМ). Значение $r_c^{\max}$ можно получить из соотношения [11]:

$$r_c^{\max} = \frac{1}{2®}\left(\frac{K_{1R}^{\max}}{\pm_T}\right)^2. \qquad (12)$$

Расчет D_s для ПМ по соотношению (10) показал, что связь D_s с комплексом свойств, определяемых соотношением (9), является единой для ПМ из сталей независимо от уровня предела текучести $\pm_T$. Так, универсальная связь между фрактальной размерностью зоны предразрушения с обратной величиной числа самоподобных кластеров ПМ в зоне, достигших порога упругости фрактальной среды, для ПМ из сталей с различными пределами текучести удовлетворительно описывается соотношениями:

$$M = 0: \quad \frac{D_s - 2}{(1/i_r^c) - 10^{-2}} = \frac{3-2}{10^{-3} - 10^{-2}}; \qquad (13)$$

$$M = 1: \quad \frac{D_s - 3}{(1/i_r^c) - 10^{-4}} = \frac{2-3}{5 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}}. \qquad (14)$$

Сопоставление полученных значений D_s с данными по D_q, отвечающими базовым множествам, позволило выделить ПМ тех марок стали, которые способны к самоорганизации и перестройке мультифрактальных структур при деформировании (прессовании). В таблице 5 приведены данные по

тестированию фрактальных структур ПМ в зоне предразрушения для сталей с различным пределом текучести $196 \le \pm_T \le 898$ МПа.

Можно видеть, что из изученных ПМ 29 марок стали только 6 с $\pm_T \le 627$ МПа показали способность к упорядоченной самоорганизации фрактальных структур в ПМ, обеспечивая повышенную устойчивость к разрушению.

Таблица 5

Результат тестирования типа структур в зоне предразрушения для ПМ из сталей с различным пределом текучести

Марка стали	$\pm_{0,2}$, МПа	D_s	Тип структуры
20Ю4	268	2,95	Мультифрактальная; $2{,}67 \le D_s \le 2{,}95$
10СГАТЮ	333	2,95	
12СТАЮФ	363	2,88	
12Г2МФТ	627	2,86	
09ХГ2Н2АБД4	412	2,77	
ЮХГСМЮБА4	450	2,71	
Рельсовая (прокат)	502	2,55	Хаотическая; $D_s \le 2{,}67$
Х18Н10Т	256	2,48	
14Х2МРЮ4	848	2,40	
09Г2СШ	317	2,31	
16ГС	300	2,25	
12Х2М	583	2,26	
Констр. (сварив.)	673	2,29	
Сталь 3	196	2,17	
Сталь 3	235	2,18	
16ГНЮ4	255	2,12	
20К	256	2,06	
20	264	2,10	
16ГС	300	2,25	
09Г2С	329	2,05	Хаотическая; $D_s \le 2{,}67$
08ГГ	342	2,18	
17ГС	364	2,16	
17Г1С	377	2,11	
17ГСУ	385	2,07	
16Г2АЮ	394	2,0	
16ХГ2СФ	559	2,09	
Констр. нормализ.	282	2,14	
Констр. нормализ.	334	2,04	
Рельсовая (прокат)	360	2,05	

ВЫВОДЫ

1. На основе подходов нелинейной динамики, фрактальной геометрии и мезомеханики проведен анализ физико-механических свойств прессуемых

ударно-вибрационным методом ПМ. При этом установлены: универсальные свойства указанных материалов в рамках моделей хаотических систем, упорядоченная самоорганизация фрактальных дислокационных структур, области устойчивости мультифрактальных множеств среды, связь инвариантных комплексов механических свойств с фрактальной размерностью структуры зоны предразрушения.

2. Показана реализация детерминированного хаоса при самоорганизации мезоструктур в процессе деформации и разрушения изделий из ПМ.

3. На примере анализа ПМ, изготовленных из 29 марок стали, установлено, что использование концепции базовых множеств позволяет тестировать конструкционные материалы на устойчивость структуры, как в процессе прессования ПМ ударно-вибрационным методом, так и при наличии в них трещины.

4. Проведенный анализ показывает перспективность развития фрактальной мезомеханики ПМ с учетом закономерностей нелинейных динамических систем, а также для уточнения существующих (рабочих) моделей структуро- и формообразования материалов (в т.ч. ПМ), принятых в современном материаловедении.

Список литературы: **1.** *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 411с. **2.** *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature. – San Francisco: Freeman, 1982. **3.** *Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др.* Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 258с. **4.** Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов /Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298с., Т. 2. – 320с. **5.** *Vstovsky G.V.* Transform information: A symmetry breaking measure// Found. Phys. –1997. – V. 27. – No. 10. – P. 1413-1444. **6.** *Курдюмов С.П., Князева Е.Н.* Синергетическое видение мира: режимы с обострением // Сб. «Самоорганизация и наука». – М., 1994. – С. 162-186. **7.** *Ахромеев Т.О., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А.* Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992. **8.** *Bak R., Tang C., Weisenfeld K.* Self-organized criticality // Phys. Rev. A. – 1988. – V. 1. – No. 1. - P. 364-374. **9.** *Feigenbaum M.J.* Universal behavior in nonlinear systems // Science. – 1980. – V. 1. – No. 1. – P. 4-27. **10.** *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260с. **11.** *Иванова В.С.* Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 157 с. **12.** *Ivanova V.S.* Synergetics. Strength and fracture of metallic materials. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1998. – 288p. **13.** *Иванова В.С.* О связи структуры со свойствами в критических точках // Сб. „Институту металлургии им. А.А. Байкова – 60 лет". – М.: Элиз, 1998. – С. 412-429. **14.** *Шевелев И.М., Марутаев Н.А., Шмелев И.П.* Золотое сечение. Три взгляда на природу гармонии. – М.: Стройиздат, 1990. – 543с. **15.** *Бовенко В.Н.* Теория акустической эмиссии в деформированных кристаллах // Прогноз землетрясений. – 1983. – Т. 14. – С. 70-91. **16.** *Голубев О.Н.* Биоструктуры как фрактальное отображение квазикристаллической геометрии // Сознание и физическая реальность. – 1996. – Т. 1. - № 1-2. – С. 85. **17.** *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин Н., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 383с. **18.** *Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закирничная М.М.* Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. – Уфа: УГНТУ, 1998. – 366с. **19.** *Kubin L.P., Lepinoux J.* The dynamic organization of dislocation structures // Proc. 8th Int. Conf. "Strength of metals and alloys" (ICSMA8), 22-26 Aug., 1988, Tampere. – Oxford, 1989. – Vol. 1. – P. 36. **20.** *Балохонов Р.Р.* Численное моделирование процесса деформации на мезоуровне и построение кривых течения поликристаллических материалов. Автореф. дис. …канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1999. **21.** *Панин С.В.* Исследование пластической деформации и разрушения поликристаллических материалов на основе алюминия методами технического зрения. Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Томск, 1997. **22.** *Kuznetsov P.V., Panin V.E., Panin S.V.* Deformation mechanisms of duralumin at the mesoscale level and stages of fractal dimension // Abstracts of V Int. Conf. "Computer-aided design of advanced materials and technologies", August 4-6, 1997, Baikal Lake, Russia. – Tomsk: ISPMS SB RAS. – P. 63-64. **23.** *Уэбман И.* Упругое поведение фрактальных структур. Фракталы в физике / Под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти. – М.: Наука, 1988. – 672с. **24.** *Баланкин А.С.* Упругие свойства фракталов, эффект поперечных деформаций и динамика свободного разрушения твердых тел // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319. - № 5. – С. 1098-1101. **25.** *Halsey T.C., Jensen M.H., Kadanoff L.P., Procaccia I., Shrailtlan B.I.* Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets // Phys. Rev. A. – 1986. – V. 33. – No. 2. – P. 1141-1151. **26.** *Sih G.C.* The strain energy density concept and criterion // The Proc. of the Aeronautical Soc. of India (Special issue on fracture mechanics). – 1985. – V. 37. – No. 1. – P. 43-60.

Поступила в редколлегию 16.09.06.

УДК 662.741.3.022: 621.979: 539.218

А.Н. НЕСТЕРОВ, аспирант, ***М.А ОСТАПЕНКО***, канд. техн. наук,
Донецкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПРОТАЛКИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ СЫПУЧИХ И ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ ПОЛУКОКСОВАНИЯ И КОКСОВАНИЯ

Стаття присвячена визначенню силових навантажень при пересуванні сипких та зернистих матеріалів у печах напівкоксування і коксування. Розглянуті та експериментально перевірені дві формули для розрахунку середнього напруження на поверхні контакту устрою для пересування. Показана умова, при виконанні якої доцільно використання формулу, яка отримана з прийняттям гіпотези плоских перетинів і адекватно описує експериментальні дані. Пропонується використання узагальненого геометричного критерію подібності при моделюванні силових навантажень. Розглянуті методики розрахунку силових навантажень при різних значеннях узагальненого геометричного критерію подібності.

The article was devoted to determination of the power loading at the movement of friable and grainy materials in the stoves of semicoking and coking. Are considered and experimentally tested two formulas for computation of middle tension on the surface of contact of the mode for the movement. A condition, at implementation of which expediently the use the formula which was got with acceptance of hypothesis of the flat crossing and adequately described experimental data, was shown. The use of the generalized geometrical criterion of similarity at the design of the power loading is offered. Considered methods of computation of the power loading at different values of the generalized geometrical criterion of similarity.