



УДК 517.538.72  
ББК 34

## О САМОПОДОБИИ СТРУКТУР, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Л.М. Семенова, Ю.С. Бахрачева, С.В. Семенов*

В работе представлены некоторые аспекты исследований структур пространственной самоорганизации сталей после термоциклического воздействия с помощью метода фрактального формализма. Показано, что наблюдаемые после циклического теплового воздействия структуры могут характеризоваться наличием свойства инвариантности своего строения на разных масштабных уровнях.

**Ключевые слова:** термоциклическая обработка, фрактал, самоорганизация, самоподобие, фрактальная размерность, диссипативные структуры.

### Введение

Извечная проблема выбора материала состоит в необходимости сочетания хорошей прочности и достаточной пластичности. Долгое время эти свойства считались взаимно исключаящимися. В состоянии равновесия все металлы имеют высокую пластичность и низкую прочность. Имевшиеся в распоряжении технологов средства позволяли повышать прочность, но при этом пластичность уменьшалась. Появление в конце XX века энергоёмких технологий вселило надежду, что эта проблема может быть решена за счет увеличения энергии, вводимой в материалы при выплавке, пластической деформации и термической и химико-термической обработке.

С начала появления науки о материалах было установлено, что изменение их основных характеристик зависит от переменных состояния (объем, давление, температура). Все постулаты термодинамики основаны на понятиях энергии и энтропии. Они считаются функциями переменных состояния. Современная термодинамика подразделяется на три области: равновесную термодинамику, линейную

неравновесную термодинамику и нелинейную термодинамику.

Нелинейные состояния возникают при введении в материал большого количества энергии, которая совершает работу по изменению состояния системы. При этом, как известно, возникает энтропия, постоянная спутница энергии. В системах возникают конкурирующие противоположно направленные процессы, приводящие к изменению состояния системы с переходом в «нелинейный» режим [5]. В этом случае имеется нелинейное состояние системы, и она приобретает способность переходить к одному из многих возможных новых состояний. На выбор этого состояния влияют малые факторы, не всегда учитываемые при выполнении исследований: флуктуации, неоднородности или другие случайные факторы. Неравновесные системы могут развиваться непредсказуемо. Для этих систем необходим вероятностный характер описания.

Технологические процессы с использованием нелинейных зависимостей изменения параметров при внешнем воздействии в металлведении появились еще до создания теории неравновесной термодинамики. В работах академика В. Садовского и профессора М. Бернштейна была доказана возможность значительного повышения пластических свойств металлов при сохранении их прочности за счет двух противоположно направленных

ных сил: деформационного наклепа и релаксационных процессов. В работах В. Садовского фазонаклепанный аустенит получался в результате перехода мартенсита в аустенит при нагреве. В работах Бернштейна фазовый наклеп аустенита создавался совмещением пластической деформации с фазовыми превращениями. Одно из отличий фазонаклепанного аустенита от равновесного аустенита состоит в изменении морфологии границ зерен. В равновесном состоянии границы зерен тонкие, прямые. В фазонаклепанном аустените границы зерен извилистые, местами пилообразные, прерывистые.

В состав неравновесных систем обычно входят структурно-кинематические элементы, связанные непосредственно с внутренними параметрами системы и объединенные определенной закономерностью. Неравновесные состояния открытой системы часто сопровождаются явлениями самоорганизации структурных элементов, составляющих такую систему [1–4; 8]. Динамика процессов самоорганизации в таких системах оказывается крайне сложной и нерегулярной, что отражается на поведении многих физических характеристик системы.

При термоциклическом воздействии вещество, подверженное притоку энергии извне, оказывается в неравновесном состоянии. Структурно-кинетические элементы системы благодаря наличию динамических связей самоорганизуются. При этом, как правило, существенно изменяются и физические свойства вещества [7].

Наряду с этим, во многих областях физики в последнее время стало вызывать большой интерес исследование фрактальных множеств. Известно, что многие случайные природные среды являются фрактальными структурами. Самоорганизация диссипативных структур сопровождается нарушением симметрии исходного состояния в системе и может быть охарактеризована величиной фрактальной размерности.

Таким образом, в процессе самоорганизации изменяются фрактальные характеристики этой системы, что определяет возможность объединения подходов описания явлений самоорганизации и теории фракталов.

Общим для систем, обладающих свойством самоорганизации, является взаимодействие большого числа подсистем, приводящее

к коллективным эффектам с характерными пространственными масштабами, существенно превосходящими размеры отдельных подсистем. При изменении определенных условий или управляющих параметров в системе могут образовываться качественно новые структуры в макроскопическом масштабе. Такие системы способны находиться в различных устойчивых состояниях, поддерживаемых за счет непрерывного притока вещества или энергии в систему. Следствием этого является развитие неустойчивости разных масштабов, возникающей в результате конкуренции стабилизирующих и возмущающих эффектов. В результате в системе возникают крупномасштабные корреляции, то есть происходит самоорганизация, а сама система приобретает неоднородное распределение параметров (тепла, деформаций, повреждений, концентраций и т. д.). Этот процесс обретения системой неоднородностей самоподобен и распространяется на другие масштабы, что приводит к появлению у системы принципиально новых свойств.

## 1. Постановка задачи

В данной работе исследуются состояния самоорганизации в стали 25 ХГТ, подвергнутой термоциклическому воздействию.

Как известно, диссипативные структуры возникают в открытой неравновесной системе при некотором пороговом воздействии и при наличии особых динамических связей. Этому условию удовлетворяет металл, находящийся при циклическом тепловом воздействии. В такой системе под действием внешней силы непрерывно создаются и аннигилируют дефекты, что приводит к возникновению неких стационарных структур, свойства которых существенно влияют на характеристики исследуемых образцов. Надежных аналитических инструментов, позволяющих выявить момент перехода системы в когерентный режим, не существует. В то же время при переходе системы в это особое состояние наблюдаются признаки самоорганизации в ее микроструктуре. Поверхность стали при определенном количестве циклов может быть фрактальной как в макроскопическом, так и микроскопическом масштабе. В таком случае на-

блюдаемые структуры численно можно описать в терминах фрактального анализа.

В то же время возникновение самоорганизации элементов микроструктуры после термоциклирования сопровождается сильным изменением свойств материала, поэтому данный эффект представляет существенный интерес с практической точки зрения. Однако условия возникновения и природа наблюдаемых пространственных корреляций все еще остаются неясными. Наблюдаемые процессы самоорганизации носят крайне сложный характер и трудно поддаются описанию. В этой связи создание алгоритмов прогнозирования поведения исследуемых материалов в областях, далеких от состояния равновесия, в которых проявляются свойства самоорганизации и детерминированного хаоса, а также определение взаимосвязи особенностей пространственного упорядочивания с изменением физических свойств этих материалов представляются актуальными, так как позволят разработать принципы управления структурой материалов в неравновесных условиях для получения материалов с заданными свойствами.

## 2. Физический эксперимент

В данной работе исследуется способ перевода системы в нелинейное состояние путем термоциклического воздействия на нее. Если во время неоднократных нагревов и охлаждений в системе происходят процессы структурных и фазовых превращений, то из-за разности их удельных объемов развиваются внутренние процессы, аналогичные тем, которые наблюдаются при пластической деформации. При увеличении числа циклов дислокационное строение стали постепенно усложняется. Образующиеся дефекты взаимодействуют между собой. Появляются локальные участки, отличающиеся структурой, химическим составом, напряженным состоянием и плотностью дефектов внутреннего строения. Движение дефектов начинает приобретать коллективный характер. Распределение дефектов становится неравномерным, появляются клубки дислокаций. Дальнейшее усиление внешнего воздействия приводит к увеличению плотности дефектов кристаллического строения – и в отдельных

участках, при достижении критического значения плотности, формируются ячейки. Внутри таких ячеек плотность дефектов значительно снижается и наблюдается у их границ. Границы ячеек подвижны: они легко перемещаются, распадаются, снова возникают. Появление такой структуры сопровождается повышением пластичности металла. По предложению В.Е. Панина [6], границы ячеек названы «сдвигонеустойчивыми дефектными фазами» и рассматриваются как диссипативные структуры, находящиеся в аморфном состоянии. В них отсутствует дальний порядок. Они имеют собственное поле напряжений и характеризуются низкой энергией образования дефектов. Эти фазы Панина находятся в динамическом равновесии с деформированным кристаллическим материалом. Описанное состояние названо «атом-вакансионным». В результате происходит синхронизация релаксационных процессов на всех структурных уровнях: макро-, микро-, мезо- и наноуровнях.

В этих состояниях наблюдаются пространственно самоорганизованные структуры с элементами самоподобия на разных масштабных уровнях. Пример самоорганизованной структуры после термоциклического воздействия (сталь 25ХГТ после пяти циклов термоциклирования в интервале температур 600–850 °С,  $\times 400$ ) представлен на рисунке 1. На рисунке 2 показана та же структура с увеличением  $\times 200$ .



Рис. 1. Границы аустенитных зерен в стали 25ХГТ после пяти циклов термоциклирования в интервале температур 600–850 °С.  $\times 400$



Рис. 2. Границы аустенитных зерен в стали 25ХГТ после пяти циклов термоциклирования в интервале температур 600–850 °С.  $\times 1\,200$

При оптическом увеличении мельчайшие фрагменты диссипативной структуры получаются очень похожими на объекты большого масштаба. Это предопределяет масштабную инвариантность основных геометрических особенностей наблюдаемых объектов, их неизменность при изменении масштаба. При большем увеличении на одних и тех же участках границ зерен обнаружено большее количество изгибов границы, так как при малых увеличениях малые изгибы нельзя учесть. Однако следует отметить, что для этих структур существуют некоторые минимальный и максимальный масштабы длины, ограничивающие область, вне пределов которой основное свойство этих структур – самоподобие – пропадает.

Обнаруженные структуры крайне сложны и нерегулярны, содержат произвольно малые масштабы, имеют некоторую форму самоподобия как на единичном, так и на множественных масштабных уровнях. Использование объектов классической геометрии для их моделирования представляется крайне затруднительным. Однако можно заметить, что эти структуры часто характеризуются бесконечным повторением одного и того же рельефа облученной поверхности, увеличенного или уменьшенного в несколько раз. Известно, что подобное проявление свойства самоподобия характерно для фракталов [6]. В связи с этим исследуемые объекты могут быть идентифицированы как фракталы [7; 9]. Известно, что

метод фрактального анализа в течение ряда лет используется в материаловедении [10–11], однако в этих работах объектом исследования были зеренная структура или пористые материалы. В данной работе рассматривается эффект масштабной инвариантности для впервые полученных пространственно организованных структур после ионного облучения.

### 3. Фрактальная параметризация

Тенденции развития современного научного направления в области физики открытых систем для объяснения наблюдаемых комплексных явлений требуют объединения таких областей знаний, как детерминированный хаос, фрактальная геометрия и теория информации. В данной работе принимается точка зрения, согласно которой фракталы должны определяться в терминах дробной (фрактальной) размерности. В связи с этим для количественного описания процессов самоорганизации и оценки взаимосвязи между характеристиками фрактальной структуры и параметрами внешнего воздействия могут быть применены методы фрактального анализа. При наличии у изучаемого объекта свойства самоподобия, его можно количественно характеризовать величиной фрактальной размерности [9–12].

Пусть  $d$  – обычная Евклидова размерность пространства, в котором находится фрактальный объект. Покрыв этот объект целиком  $d$ -мерными «шарами» радиуса  $I$ , предположим, что потребовалось для этого не менее чем  $N(I)$  шаров. Тогда общее определение фрактальной размерности  $D$  можно переписать в следующем виде:

$$D = - \lim_{I \rightarrow 0} \frac{\ln N(I)}{\ln I} .$$

При оценке фрактальной размерности получается тот же результат, если использовать процедуру покрытия фрактала кубами (квadrатами, если фрактальный объект располагается на плоскости). В силу того что для природного фрактала интервал самоподобия ограничен, размер ячейки покрытия для него может варьироваться в определенном диапазоне, максимальное значение которого определяется размерами объекта, а минимальное – его элементарным структурным элементом.

Таким образом, для оценки размерности необходимо применение численного алгоритма, который заключается в следующих шагах:

- получение зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки;
- выделение на ней линейного участка (в двойном логарифмическом масштабе);
- аппроксимация зависимости на этом участке линейной функцией.

В данной работе оценка фрактальной размерности осуществлялась следующим образом:

- определялась зависимость количества квадратов  $N$ , покрывающих исследуемый объект, от их размера  $\varepsilon$  (масштаба рассмотрения);
- строился график зависимости  $\log N(\varepsilon)$  от  $\log \varepsilon$ , и оценивался тангенс угла наклона линии для этой зависимости, являющейся оценкой фрактальной размерности (см. рис. 3).

Для применения описанной методики использовались фотографии на рисунках 1, 2. Они были приняты как реализация пространственного стохастического процесса, определенного на некоторой области размерности 2 [9–12].

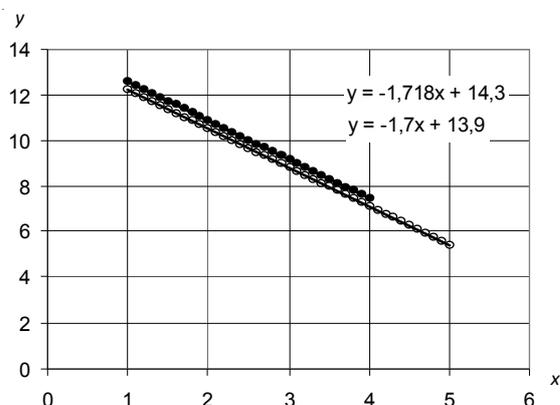


Рис. 3. Определение тангенса угла наклона зависимости  $y = \log N(\varepsilon)$  от  $x = \log \varepsilon$  при увеличениях:

«●» —  $\times 400$  и «○» —  $\times 1\ 200$

В результате расчета фрактальной размерности для структур самоорганизации на увеличении  $\times 400$  и  $\times 1\ 200$  оказалось, что среднее значение фрактальной размерности для структуры на увеличении  $\times 400$  составляет:  $D = 1,7 \pm 0,06$ , а среднее значение фрактальной размерности для структуры на уве-

личении  $\times 1\ 200$  составляет:  $D = 1,65 \pm 0,08$ , то есть практически эти значения совпадают.

### Заключение

Было показано, что наблюдается иерархия самоорганизованных структур, получаемых при термоциклической обработке на различных масштабных уровнях. Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемые на разных масштабных уровнях самоорганизованные структуры являются конструктивными элементами одного и того же фрактального объекта. Понимание природы и причин возникновения диссипативных структур, а также принципов формирования подобных состояний может служить основой для развития новых технологий термической обработки материалов. Перед разработчиками нового материала или новой технологии обработки открываются не известные ранее пути как в области контроля свойств материалов, так и создания новых.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова, В. С. Мультифрактальная параметризация микроструктуры немагнитных сталей Mn-Ni-Cu-V с целью выявления эффекта синергизма легирования / В. С. Иванова, Е. Г. Курзина // Металлы. — 1999. — № 2. — С. 27–35.
2. Иванова, В. С. Роль фрактальной структуры в формировании механических свойств металлов и сплавов / В. С. Иванова // МиТОМ. — 2001. — № 3. — С. 15–24.
3. Иванова, В. С. Междисциплинарный анализ диссипативного состояния физико-химических систем при их эволюции / В. С. Иванова // МиТОМ. — 2006. — № 9. — С. 12–19.
4. Иванова, В. С. От наноматериалов к интеллектуальным нанотехнологиям / В. С. Иванова, Г. Э. Фолманис // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 9–13.
5. Пригожин, И. От существующего к возникающему / И. Пригожин. — М.: Наука, 1985. — 327 с.
6. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гринев. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. — 255 с.
7. Семенова, Л. М. Химико-термическая обработка стали 20X в условиях циклического изменения температуры / Л. М. Семенова, С. В. Семенов, С. Н. Крайнова // МиТОМ. — 2003. — № 7. — С. 3–7.

8. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М. : Наука, 1994. – 363 с.

9. Хмелевская, В. С. Неравновесные состояния в твердом теле / В. С. Хмелевская. – Обнинск : [Б. и.], 2004. – 155 с.

10. Хмелевская, В. С. Эффект дальнего действия как проявление коллективного взаимодействия в облучении металлического сплава / В. С. Хмелевская, В. Г. Малынкин // *Материаловедение*. – 1998. – № 2. – С. 25–33.

11. Хмелевская, В. С. Фрактальные структуры в металлических материалах после ионного облучения и лазерного воздействия / В. С. Хмелевская, В. Г. Малынкин, Е. В. Базалеев // *Письма в ЖТФ*. – 1994. – Т. 20, вып. 23. – С. 21.

12. Хмелевская, В. С. Превращения в электронной подсистеме металлических твердых растворов в области радиационно-индуцированного фазового перехода / В. С. Хмелевская, В. Г. Малынкин, М. Ю. Канунников // *Письма в ЖТФ*. – 1998. – Т. 24, № 3. – С. 59–60.

## SELF-SIMILARITY AT DIFFERENT SCALE LEVELS IN THERMOCYCLIC

*L.M. Semenova, J.S. Bakhracheva, S.V. Semenov*

Self-organized structures after thermocyclic in steels have been studied using the method of fractal dimension. It was demonstrated that structures after thermocyclic can be characterized by the compatibility of scale invariance properties at different scale levels.

**Keywords:** *thermocyclic, fractal, self-organization, self-similarity, fractal dimension, dissipative structures.*