

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООРГАНИЗАЦИИ В ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Бондаренко

В работе рассматриваются структуры в металлических материалах, подвергнутых лазерному облучению, имеющие свойства пространственной самоорганизации. Описан метод компьютерного анализа самоорганизованных структур с использованием мультифрактального аппарата. Полученные закономерности в изменениях наборов мультифрактальных параметров облученных поверхностей металлов использованы для моделирования развития неустойчивости методом клеточного автомата.

Введение

В некоторых новейших технологических процессах, в том числе используемых в атомной и космической технике, вещество находится в радиационном поле. В этих случаях мы имеем дело с открытой неравновесной системой, подвергающейся притоку энергии или вещества извне [1, 2]. В этих состояниях могут наблюдаться пространственно самоорганизованные структуры с элементами самоподобия на разных масштабных уровнях.

Работа посвящена исследованию и описанию с помощью фрактальных характеристик явлений самоорганизации при взаимодействии ионного и лазерного излучения с металлическими сплавами. Такие явления в ряде случаев сопровождаются сильнейшим изменением физических свойств системы, которые не могут быть описаны в рамках равновесной термодинамики. В связи с этим актуальность исследования взаимодействия излучения с веществом обусловлена необходимостью выявления подходов к описанию возникающих при определенных условиях процессов самоорганизации. В частности, сделана попытка применения теории фракталов и использования некоторых компьютерных моделей, описывающих эти процессы.

1. Постановка задачи

Выявление характера самоорганизации сложных систем является существенным фактором, позволяющим понять закономерности поведения этих систем в неравновесных условиях. При обнаружении в облученных материалах эффектов самоорганизации важным является тот факт, что материал может обладать новыми физическими свойствами. Представление об эволюции процессов самоорганизации при

воздействии ионного или лазерного излучения открывает возможность направленного изменения физических свойств облученных материалов. Детализация и уточнение с помощью компьютерного моделирования механизмов процессов самоорганизации после облучения металлических сплавов, а именно установление связи фрактальных характеристик самоорганизованной структуры со свойствами материала и параметрами внешнего воздействия представляется крайне перспективным при создании материалов с новыми свойствами. Актуальной задачей является и разработка простого способа распознавания и количественной параметризации процессов развития самоорганизации в облученных металлических материалах, позволяющего оценить условия формирования устойчивых поверхностных наноструктур при создании материалов с новыми свойствами.

2. Методика

2.1. Объекты. Рассматривается формирование самоорганизованных структур в металлических сплавах при облучении поверхности сплава лазерным излучением. На рис. 1 показаны примеры таких структур, полученных в металлических сплавах Ni-Cr и Fe-Cr-Ni. До облучения поверхность сплава была однородной, микроструктура не имела каких-либо особенностей. В ходе эксперимента использовалось излучение твердотельного лазера ЛТИ-406 (YAG:Nd) с длиной волны 1.06 мкм и длительностью импульса 10–20 нс, мощностью 3 Вт, на частоте 25 Гц, 25 импульсов в секунду, 120 мДж в импульсе. Целью эксперимента по лазерному облучению металлических образцов являлось получение иерархии состояний вещества с признаками пространственной самоорганизации в зависимости от управляющего параметра для дальнейшего исследования эволюции наблюдаемого в системе процесса самоорганизации. В качестве управляющего параметра было выбрано число импульсов, поступивших в систему и определяющих количество переданной энергии.

На первом этапе происходит образование поверхностных периодических структур [3], представляющих собой систему упорядоченных линейных выступов и впадин рельефа поверхности (рис. 1, *a*). Такие структуры имеют период порядка длины волны света и появляются при определенном количестве поступивших в систему импульсов.

Следует отметить, что при лазерном воздействии световой квант не в состоянии сместить атом с его места в решетке и образовать дефект кристаллической решетки. Пучок когерентного светового излучения в состоянии подействовать только на электроны твердого тела, которые в дальнейшем могут внести изменения в состояние ионов. Таким образом, при образовании эффектов самоорганизации имеет место коллективное взаимодействие множества элементарных объектов на разных масштабных уровнях.

Для получения иерархии состояний системы количество импульсов, вводимых в систему, увеличивалось (для сплава Fe-Cr-Ni от 200 до 11000, для Ni-Cr – от 100 до 800 импульсов). При увеличении числа импульсов, воздействующих на систему, пространственно-периодические структуры начинают перестраиваться, образуя новые элементы рельефа поверхности, но сохраняя свойства самоподобия и не переходя к хаотическому расположению элементов микрорельефа на поверхности. При этом как образование пространственно-периодических структур, так и их дальнейшая перестройка (эволюция) происходит после достижения порогового числа импульсов.

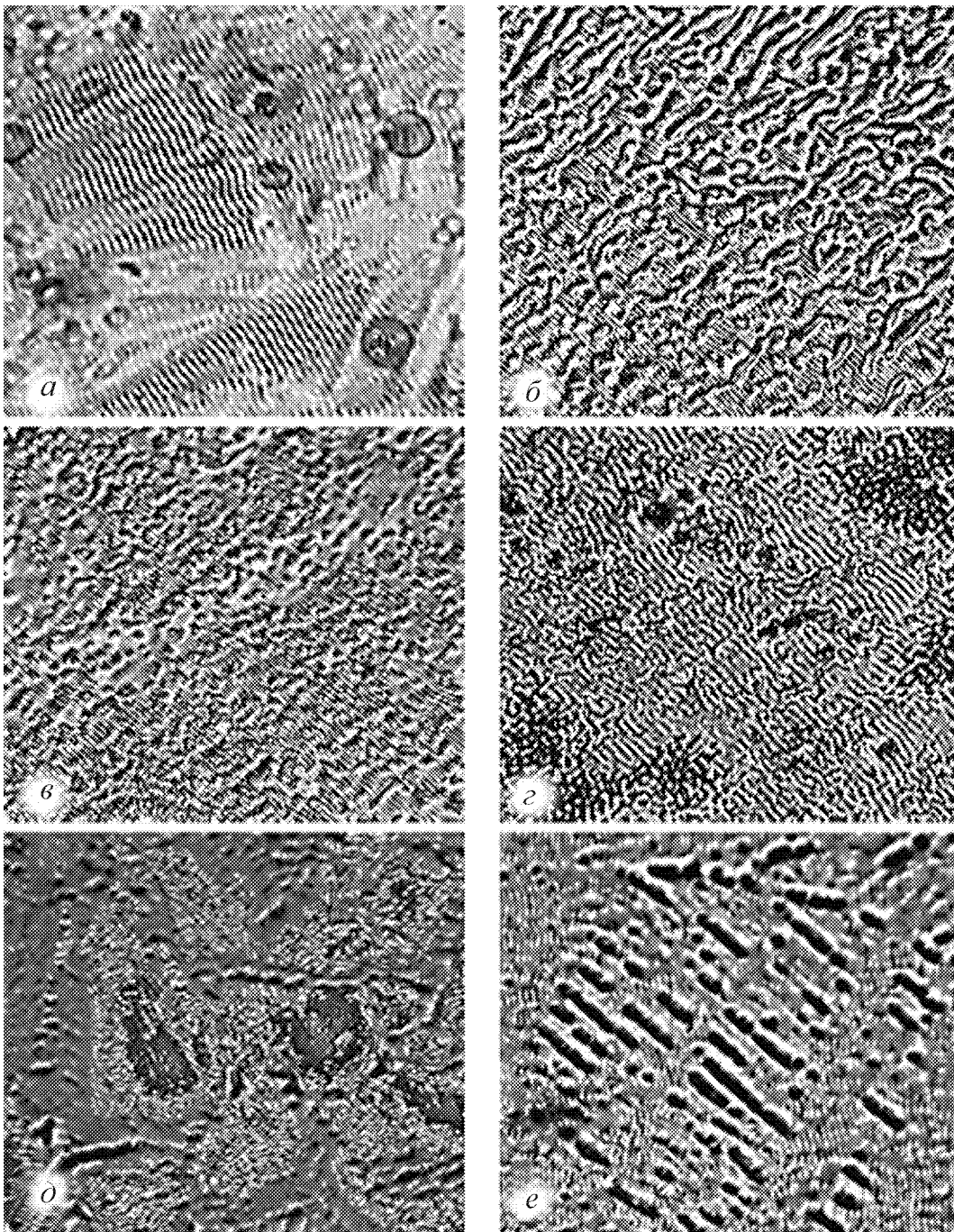


Рис. 1. Пространственно самоорганизованные структуры на металлических сплавах Ni-Cr с числом импульсов облучения 100 (а), 400 (б), 500 (в), 800 (г) и Fe-Cr-Ni с числом импульсов облучения 1000 (д) и 8600 (е)

2.2. Мультифрактальная параметризация процесса самоорганизации.

Для характеристики фрактальных множеств были использованы различные параметры, играющие роль размерности [4–5]. Их можно грубо разделить на две группы, отнеся к первой размерностные характеристики, выведенные из чисто геометрических соображений, и ко второй – размерностные характеристики, связанные с

теорией информации. Применение характеристик первой группы к физическим системам обычно приводит к недостаточно информативным результатам, в то время как характеристики второй группы служат мерой «неоднородности» фрактального множества. Далее для анализа динамики процесса самоорганизации будут использованы характеристики второго типа.

Наблюдаемые на рис. 1 структуры имеют крайне нерегулярное и запутанное строение, которое невозможно описать или задать традиционными аналитическими или геометрическими способами. Для количественного описания наблюдаемых структур в пространстве может быть использован аппарат мультифрактальной параметризации, а именно мультифрактальная размерность, однородность и упорядоченность. Опыт численного мультифрактального анализа изображений структур облученного материала показывает его эффективность при анализе процессов самоорганизации [6–9]. Методика мультифрактальной параметризации была подробно описана ранее [6], поэтому кратко опишем лишь основные параметры, используемые в процессе мультифрактальной параметризации.

В реальных физических системах самоподобие структур при больших масштабах, характерное для фракталов, не реализуется. В таких случаях используется понятие мультифракталов, содержащих подмножества с разной фрактальной размерностью. Мультифрактальная параметризация структур основана на расчете вероятности появления элемента рельефа рассматриваемого плоского изображения структуры. После текстурной обработки изображение переводится в черно-белый формат и вычисляются обобщенные фрактальные размерности Реньи

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln [\sum_i p_i^q(\varepsilon)]}{\ln \varepsilon},$$

где p_i – вероятность нахождения точки фрактала в i -й ячейке; ε – размер ячеек покрывающей сетки; $q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$ – порядок размерности. Таким образом, выделяются области наполнения с разной плотностью упаковки структурных элементов. Результатом применения этого алгоритма являются следующие количественные характеристики.

1. D_0 – размерность Хаусдорфа–Безиковича; характеризует величину фрактальной размерности.

2. $f_q = f(\alpha(q))$ – спектр сингулярностей α ; характеризует однородность структуры, то есть распределение единичных элементов структуры в евклидовом пространстве, охватывающем эту структуру. Чем больше значение f_q , тем структура более однородна, а при стремлении f_q к нулю в структуре накапливается «беспорядок».

3. $\Delta_q = D_1 - D_q$ – упорядоченность структуры; характеризует степень нарушения симметрии меры или степень неравновесности изучаемой системы по отношению к мультифрактальному преобразованию. Чем больше значение Δ_q , тем более периодична структура, то есть увеличение (по модулю) Δ_q показывает, что в структуре растет периодическая составляющая и система накачивается информацией.

4. D_1 – информационная размерность (значение D_q при $q = 1$); характеризует скорость роста количества информации.

5. D_2 – корреляционная размерность (значение D_q при $q = 2$); характеризует коэффициент корреляции между парой точек, случайно выбираемых в соответствии

с распределением вероятности меры. Корреляционная размерность характеризует вероятность нахождения в одной и той же ячейке покрытия две точки множества.

Данные мультифрактальные характеристики позволяют не только оценить влияние внешнего излучения на поведение системы, но и описать процесс эволюции самоорганизации элементов системы во времени. Так, на рис. 2, *а* представлена зависимость мультифрактальных параметров в сплаве Fe-Cr-Ni от количества импульсов лазерного облучения. При 600 импульсах значения мультифрактальной размерности и однородности значительно падают, а упорядоченность структуры несколько увеличивается. При 1400 импульсах значения мультифрактальной размерности и однородности также несколько падают, а упорядоченность растет. Эти особые точки отмечены на графиках прерывистыми линиями. В них также наблюдается изменение значения параметра микротвердости поверхностного слоя.

На рис. 2, *б* представлена зависимость мультифрактальных параметров самоорганизации в сплаве Ni-Cr от количества импульсов лазерного облучения. Для этого материала при 600 импульсах значения мультифрактальной размерности и однородность несколько уменьшаются, а упорядоченность структуры несколько увеличивается. При 400 импульсах значение мультифрактальной размерности также несколько падает, а однородность растет. Эти особые точки также отмечены на графиках прерывистыми линиями. Видно, что параметры мультифрактальной размерности коррелируют с микротвердостью поверхностного слоя.

С точки зрения характера наблюдаемой самоорганизованной структуры выделенные особые точки характеризуются полным изменением формы наблюдаемой самоорганизации. Увеличение или уменьшение значения мультифрактальной размерности говорит об усложнении или упрощении строения наблюдаемой в процессе облучения материала самоорганизации. Иными словами, наблюдается эволюционное развитие самоорганизации. Для обоих сплавов увеличение мультифрактальной размерности начинается в особой точке, достигаемой при дозе облучения в 600 импульсов. После прохождения этой точки с ростом числа импульсов также происходит значительное изменение однородности и упорядоченности наблюдаемой структуры. Строение структуры с ростом числа импульсов полностью изменяется, что можно наблюдать на рис. 1.

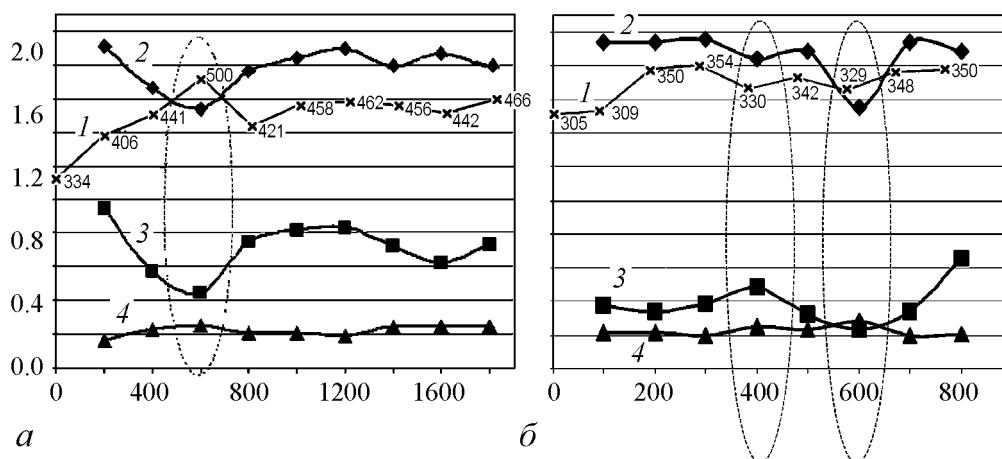


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и мультифрактальных параметров (2 – мультифрактальная размерность, 3 – однородность, 4 – упорядоченность) от количества импульсов лазерного облучения в сплавах Fe-Cr-Ni (*а*) и Ni-Cr (*б*)

3. Пространственно-временная динамика процесса самоорганизации

При анализе естественных фракталов часто используют представление о кластерах [10]. Кластером называют комплексные соединения, в основе структуры которых лежит центральный элемент – объемная ячейка из непосредственно связанных между собой элементов. С развитием теории фракталов было введено понятие фрактальных кластеров, которыми принято называть структуры, образующиеся при ассоциации множества элементарных объектов в единый крупномасштабный самоподобный объект. В соответствии с этим представленная на рис. 1, *a–d* сложная система была разделена на составляющие элементы или кластеры меньшего размера путем наложения на изображение геометрической сетки.

С этой целью для каждой дозы облучения (фиксированного числа импульсов) были получены фотографии (в цифровом формате) самоорганизованных структур, представляющие собой матрицу точек, каждая из которых обладает своей цветовой характеристикой. Данная матрица принимается за реализацию пространственного стохастического процесса, определенного на некоторой области размерности 2. При анализе фотографий использовали непрерывное квадратное ограничение, в котором наиболее наглядно представлен процесс самоорганизации. В ходе анализа цифровое изображение структуры рассматривается в виде матрицы, состоящей из 0 и 1. Дискретизация осуществляется на основе определения разности контрастов. Размер поля на поверхности облученного материала составляет 1000×1000 пикселей (или 12.5 мкм) и покрывает порядка 20 зерен облученного материала различного размера и различной кристаллографической ориентировки. Данное поле было покрыто равномерной сеткой с шагом 20 пикселей (рис. 3, *a*). Размеры ячейки сетки выбирались таким образом, чтобы каждая ячейка по возможности обеспечивала полное покрытие только одного фрактального кластера, но при этом позволяла бы производить расчет фрактальных параметров.

Анализ серии фотографий, полученных после облучения, показал, что при определенной дозе облучения наблюдается самоорганизация либо преимущественно

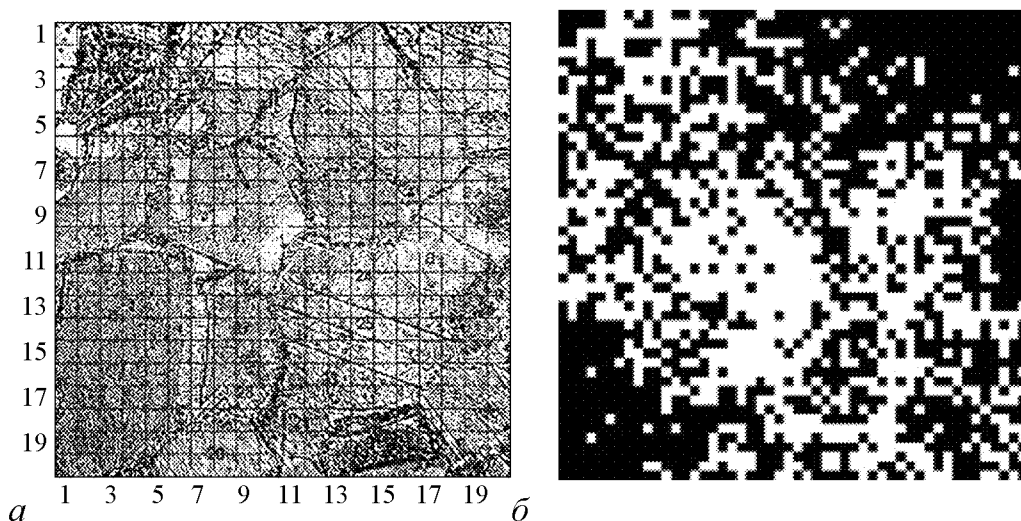


Рис. 3. Вид поверхности материала Ni-Cr после облучения с сеткой для расчета характеристик покрывающих ячеек (*a*) и кластеризация фотографии ячейками черного и белого цвета (*б*)

одного типа (в виде полос или ячеек), либо комбинация двух разных типов (ячеек и полос). Доза, при которой самоорганизованная структура одного типа переходит в самоорганизованную структуру другого типа, условно можно назвать особой точкой. Можно предположить, что в этих точках система достигает в процессе эволюции порога неустойчивости, и начинает осциллировать. Возникающие флуктуации приводят систему к самоорганизации следующего уровня. Переход между уровнями самоорганизации осуществляется постепенно. Именно поэтому в особых точках можно наблюдать самоорганизацию сразу двух типов. Опишем их подробнее. При небольшом числе импульсов структура самоорганизации представляет собой расположенные параллельно прямые линии (см. рис. 1, *a*). При увеличении числа импульсов крупные повторяющиеся прямые отрезки пересекаются перпендикулярными им отрезками меньшей длины (см. рис. 1, *b-z*). Эта структура может быть аппроксимирована геометрической сеткой. Для целей моделирования условно обозначим ячейки с полосками белым цветом, а остальные ячейки, с любыми другими элементами – черным цветом (рис. 3, *b*). Изображения самоорганизованных структур поверхности сплава Ni-Cr для фиксированных доз облучения (рис. 4, *a*) были кластеризованы в соответствии с описанным алгоритмом, и полученная в итоге серия кластеризованных изображений представлена на рис. 4, *b*. Видно, что распределение черных и белых кластеров по плоскости изображения соответствует распределению фрактальных кластеров разных типов по поверхности облученного материала. Кроме того, с увеличением числа импульсов от 100 до 300 количество черных кластеров увеличивается. Это соответствует результатам эксперимента, представленным на рис. 4, *a*. Видно, что с увеличением числа импульсов структура, состоящая из полосок, постепенно переходит в новую структуру, напоминающую по своей форме сетку. Аналогичный переход можно наблюдать и при рассмотрении последовательности кластеризованных изображений на рис. 4, *b*. С увеличением числа импульсов происходит постепенный процесс замены белых кластеров черными до тех пор, по-

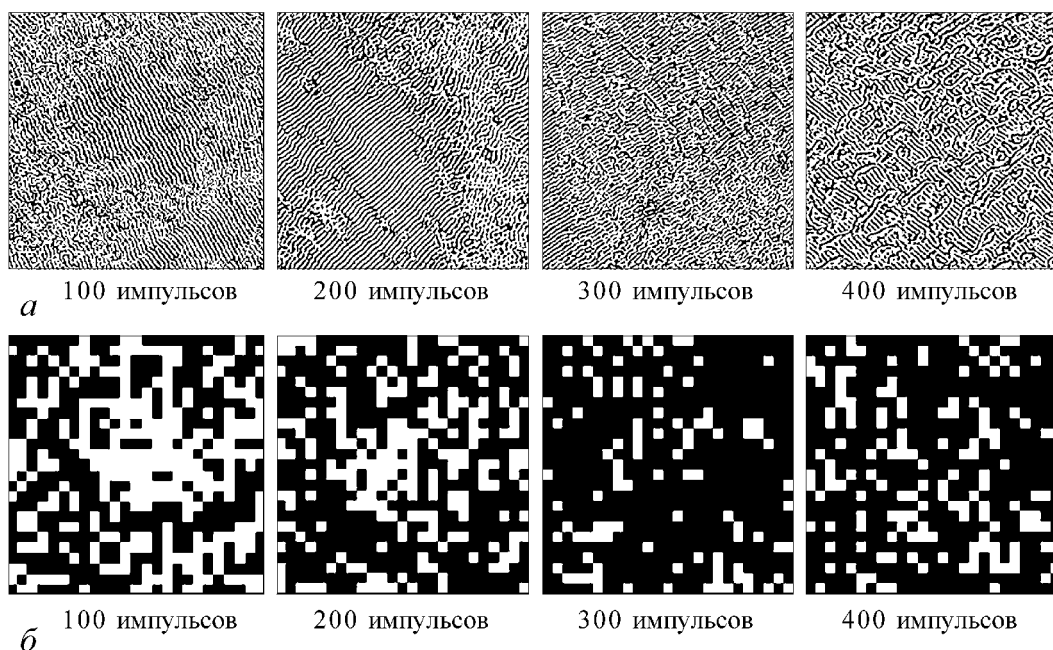


Рис. 4. Кластеризация элементов самоорганизации для сплава Ni-Cr при разном числе импульсов. Фотографии облученной поверхности (*a*) и соответствующее кластеризованное изображение (*b*)

ка при 300 импульсах черные кластеры практически полностью заполняют всю поверхность облученного материала. Затем, при 400 импульсах число белых кластеров снова начинает расти и достигает максимума при 500 импульсах. При 600 импульсах количество белых кластеров снова падает, а с увеличением числа импульсов до 800 число белых кластеров снова начинает расти.

Данный алгоритм кластеризации фактически позволяет описывать эволюцию процесса самоорганизации в зависимости от числа импульсов. Видно, что количество черных и белых кластеров в изображении последовательно меняется в зависимости от количества импульсов лазера. Процесс перехода белых кластеров в черные и черных кластеров в белые повторяется, или осциллирует. При этом наблюдаются особые точки, после прохождения которых число кластеров белого цвета резко падает, и они заменяются кластерами черного цвета. В свою очередь, после прохождения особой точки число кластеров белого цвета имеет минимальное значение, но с увеличением числа импульсов снова начинает расти до следующей особой точки.

Если задать развитие или перестройку кластеров, а также правила такой перестройки на каждом шаге итерации, появляется возможность приближенно описать наблюдаемую эволюцию процесса самоорганизации во времени в зависимости от числа импульсов. Число импульсов определяет каждый шаг итерации, так как перестройка самоорганизованной структуры при лазерном облучении зависит именно от числа поступивших в систему импульсов. Наиболее простой механизм, позволяющий реализовать такой подход, следует из теории клеточных автоматов.

Конструкция клеточного автомата представляет собой однородную среду из соприкасающихся друг с другом клеток [11]. Каждая клетка пространства занята отдельным элементарным автоматом. Совокупность клеток образует клеточное пространство, в котором функционирует автомат. Эти автоматы имеют конечный набор состояний, а их выходные сигналы есть номера их состояний. Каждый автомат имеет нескольких соседей, с которыми он обменивается информацией о состояниях.

Для моделирования эволюции процесса самоорганизации каждая клетка представленного на рис. 3, б кластеризованного изображения была принята за реализацию элементарного автомата. В качестве метода упаковки выбран квадратичный метод, когда у клетки есть ровно восемь соседей. Автомат работает в дискретном времени и имеет только два условных состояния – «0» и «1». Состояние «0» (обозначаем белым цветом) соответствует структурам самоорганизации, ранее условно обозначенным кластерами белого цвета (полоски). Состояние «1» (обозначаем черным цветом) соответствует структурам самоорганизации, ранее условно обозначенным кластерами черного цвета (ячейки). Для активизации клеточного автомата в пустое клеточное пространство вносим начальную активность в виде «зародыша». Зародыш – это совокупность элементарных автоматов, которые внешним образом переведены из пассивных состояний в какие-либо активные состояния. С этого момента начинается функционирование клеточного автомата. В качестве начального условия работы клеточного автомата будем рассматривать кластеризованное изображение самоорганизации, полученное на начальном этапе облучения (100 импульсов, см. рис. 1, а).

Для описания функционирования клеточного автомата определены следующие правила.

1. Если автомат находится в состоянии «0» и ни один из его соседей не находится в состоянии «1», то этот автомат переходит в состояние «1».

2. Если автомат находится в состоянии «0» и от трех до восьми его соседей находятся в состоянии «1», то этот автомат переходит в состояние «1».

3. Если автомат находится в состоянии «1» и от трех до семи из его соседей находятся в состоянии «1», то этот автомат остается в состоянии «1».

4. В остальных случаях автомат переходит в состояние «0».

Правила работы автомата выбирались таким образом, чтобы максимально соответствовать правилам возникновения черных и белых кластеров.

Результаты работы клеточного автомата для сплава Ni-Cr приведены на рис. 5. На вход автомата подавали кластеризованные изображения самоорганизованных структур после начального облучения 100 импульсами. Полученные в результате работы автомата изображения совмещали с кластеризованными изображениями самоорганизованных структур. Каждый шаг работы автомата моделирует 100 дополнительных импульсов облучения материала. Видно, что структура изображений в результате работы автомата напоминает кластеризованные изображения, полученные в результате эксперимента. Кроме того, в процессе работы автомата количество белых кластеров при подходе к контрольной точке в 400 импульсов падает, а в самой контрольной точке снова возрастает. Аналогичное поведение черных и белых кластеров можно наблюдать и для изображений, полученных в ходе эксперимента.

Для более детального анализа работы автомата рассмотрим распределения черных и белых кластеров в зависимости от количества импульсов для изображений, полученных в ходе эксперимента по облучению сплава Fe-Cr-Ni (от 200 до 1800 импульсов), и изображений, полученных в результате работы клеточного автомата. На рис. 6, *а*, *б* приведено сравнение диаграмм распределения количества белых и черных кластеров в эксперименте и в результате работы автомата. По оси *X* откладывается число импульсов либо число шагов работы автомата, а по оси *Y* – число соответствующих кластеров в системе. Белые кластеры обозначаются цифрой

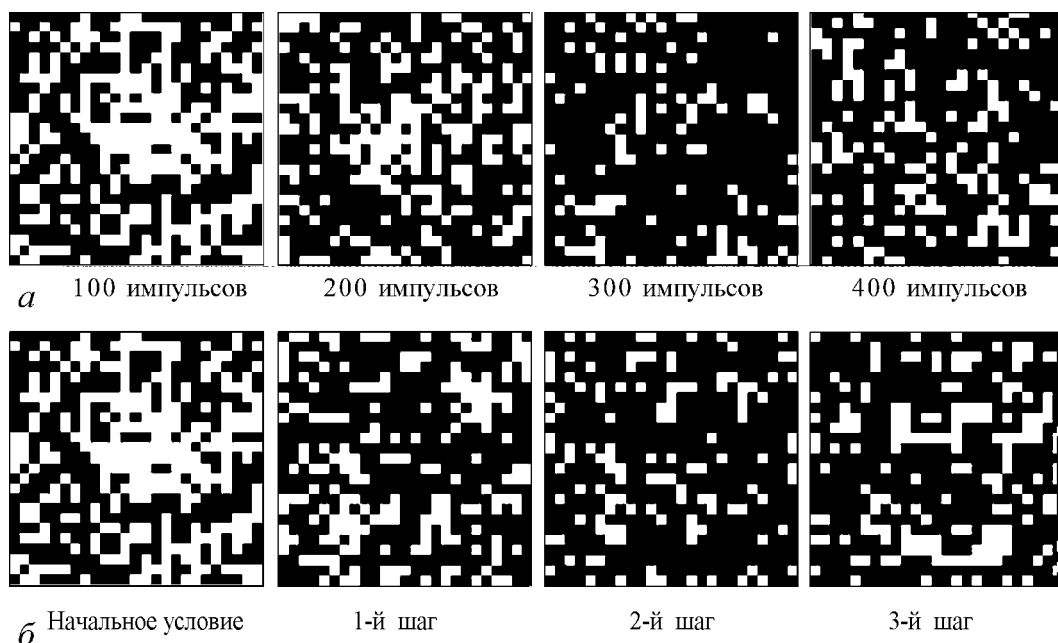


Рис. 5. Сравнение результатов работы клеточного автомата с экспериментальными данными: *а* – кластеризованные фотографии элементов структуры самоорганизации в зависимости от числа импульсов обучения; *б* – результаты работы клеточного автомата. Начальные условия – кластеризованная фотография при 100 импульсах облучения

«0», а черные кластеры цифрой «1». Видно, что соотношение между количеством белых и черных кластеров на каждом шаге работы автомата достаточно точно совпадает с распределением белых и черных кластеров в результате эксперимента. На рис. 6, в, з показаны распределения кластеров для автоматов, на вход которых были поданы в качестве начальных условий разные кластеризованные изображения, полученные при 200 импульсах облучения. Видно, что уже на третьем шаге работы автоматов соотношения между черными и белыми кластерами становятся идентичными, несмотря на разные начальные условия. Распределения кластеров внутри изображений, полученных после работы автомата, соответствуют распределению кластеров, получаемых в ходе эксперимента.

Ранее в качестве белых кластеров нами были определены фрактальные кластеры, состоящие из параллельных полос, а в качестве черных кластеров были приняты ячейки. Применяя обратное преобразование к результатам работы клеточного автомата, можно получить моделируемый в результате работы автомата рельеф поверхности на каждом шаге его работы. На рис. 7, а представлено кластеризованное изображение, полученное на 3-м шаге работы автомата. Этот шаг работы автомата моделирует лазерное облучение при 400 импульсах. Обратное преобразование этого изображения выполняется путем замены каждого белого кластера маленьким изображением фрактального кластера, состоящего из параллельных черных и белых полос. Черные кластеры соответственно заменяются вторым типом фрактальных кластеров в виде ячеек. Полученный в результате такого преобразования искусственный рельеф поверхности представлен на рис. 7, б. Очевидно, что получить такой искусственный рельеф можно на любом шаге работы клеточного автомата. На

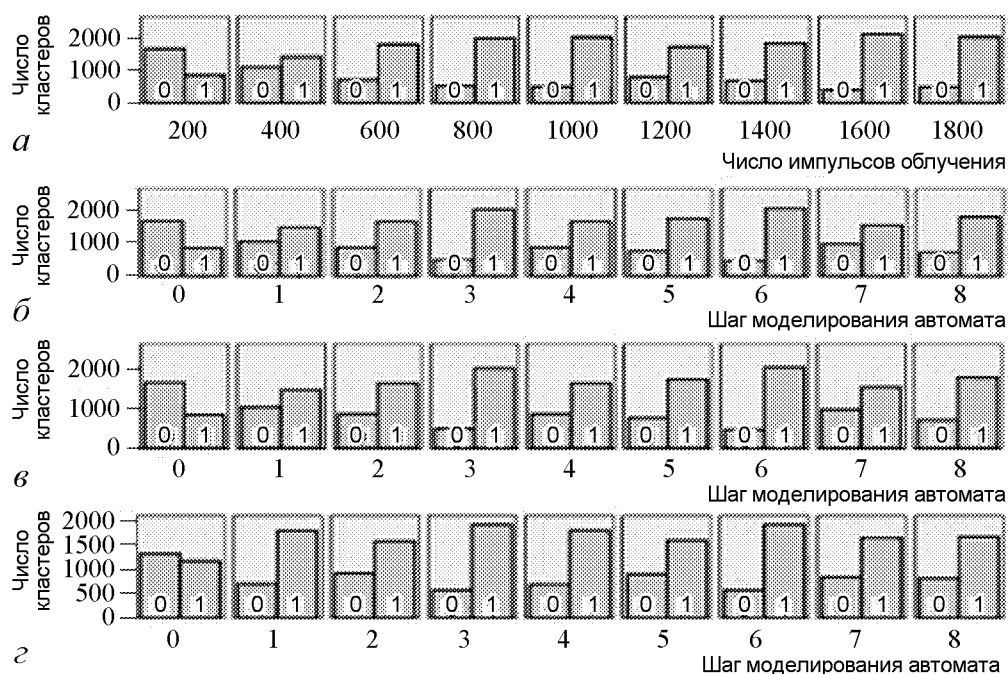


Рис. 6. Сравнение распределений черных (1) и белых (0) кластеров: а, б – в эксперименте и в результате работы автомата; в, з – в результате работы автомата для разных начальных условий – двух разных фотографий при 200 импульсах облучения

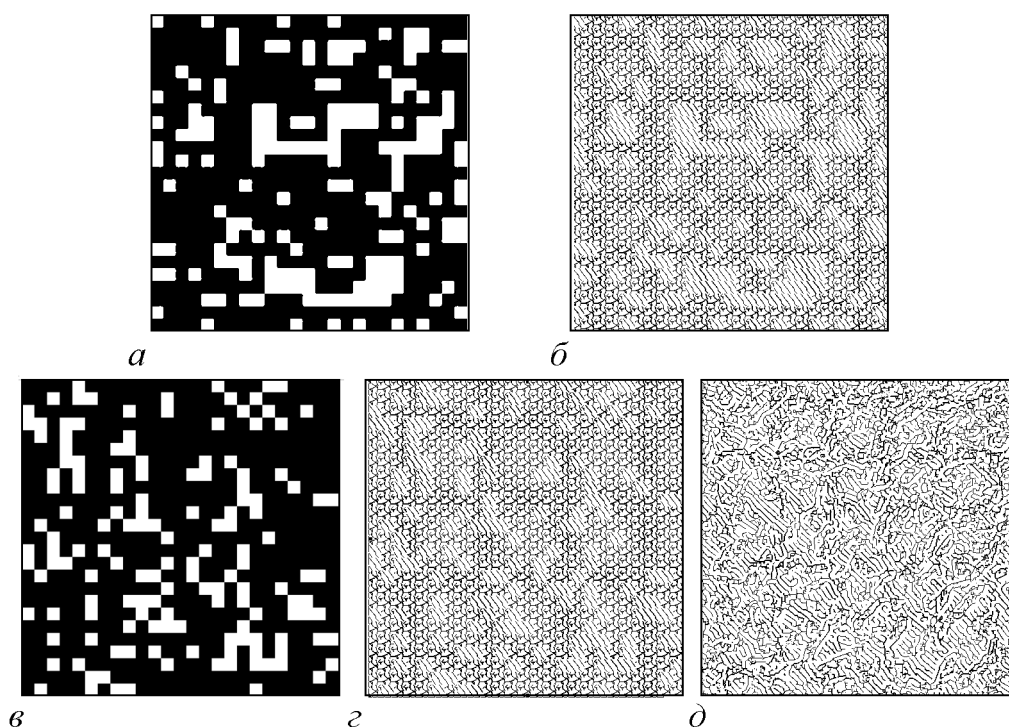


Рис. 7. Обратное преобразование кластеризованного изображения

рис. 7, в представлен результат кластеризации реального рельефа поверхности при 400 импульсах облучения, что соответствует третьему шагу работы автомата, а на рис. 7, з – его обратное преобразование. Видно, что результаты обратного преобразования кластеризованных изображений реального рельефа (рис. 7, б) и полученного в результате работы клеточного автомата (рис. 7, з) подобны. Сравнивая получаемый рельеф с реальным рельефом структуры (рис. 7, д), можно корректировать правила работы автомата с целью совершенствования получаемых моделей.

Заключение

При высоких уровнях радиационного повреждения структурные элементы в материалах оказываются пространственно самоорганизованными. Характер наблюдаемой самоорганизации может изменяться в зависимости от интенсивности радиационного воздействия. С увеличением интенсивности воздействия структура самоорганизации усложняется, и одна форма самоорганизации сменяется следующей.

С целью анализа эволюции процесса самоорганизации была получена иерархия самоорганизованных структур для разного числа импульсов лазерного облучения разных металлических сплавов. На низком числе импульсов на поверхности облученного материала наблюдаются пространственные периодические структуры, которые с увеличением поступающей в систему энергии перестраиваются в новую самоорганизованную структуру.

Применяя методы мультифрактального формализма для количественного описания однородности, упорядоченности и мультифрактальной размерности процессов самоорганизации показано, что при отслеживании изменения комбинации мульти-

фрактальных параметров можно обнаружить точки, в которых элементы самоорганизации перестраиваются, и процесс самоорганизации переходит на следующую фазу своего развития. Этот переход может также характеризоваться изменением физических параметров системы, в частности, изменением микротвердости. Значения мультифрактальных параметров между этими особыми точками остаются практически неизменными.

С помощью теории клеточных автоматов возможно охарактеризовать развитие процесса самоорганизации на поверхности облученного материала. Полученные в результате проведенного эксперимента по набору доз облучения структуры были кластеризованы с использованием двух типов самоорганизации. Оказалось, что с набором дозы система кластеров начинает осциллировать. Кроме того, при определенных дозах количество черных и белых кластеров в системе резко меняется. Изменение в изображении количества черных и белых кластеров в зависимости от числа импульсов и изменение расположения кластеров определяет эволюционную динамику процесса самоорганизации.

Модель работы автомата была реализована в двумерном пространстве с взаимодействием с ближайшими соседями (на основе правил игры «Жизнь»). Оказалось, что в результате работы автомата можно получить изображения, близкие по форме к кластеризованным изображениям, полученным из реального эксперимента. При этом работа автомата не зависит от начальных условий. Соотношения между черными и белыми кластерами на каждом шаге работы автомата и соотношения между черными и белыми кластерами на каждой дозе облучения находятся в удовлетворительном согласии.

Показано, что в полученных после работы клеточного автомата изображениях путем обратной замены черных и белых кластеров первоначальными фрагментами типовой самоорганизации можно получить двумерное изображение искусственного рельефа поверхности. Применяя подобное обратное преобразование к изображениям, полученным на последующих шагах работы клеточного автомата, можно моделировать рельеф облученной поверхности без проведения эксперимента.

Библиографический список

1. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.
2. Хмелевская В.С. Неравновесные состояния в твердом теле. Обнинск, 2004.
3. Жижин Г.Н., Москалева М.А., Шомина Е.В., Яковлев В.А. Распространение поверхностных электромагнитных волн по металлическим поверхностям // Поверхностные поляритоны / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985. С.70-104.
4. Федер Е. Фракталы. М.:Мир. 1991. 249 с.
5. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 115 с.
6. Куликова Н.В., Хмелевская В.С., Бондаренко В.В. Компьютерный анализ процессов самоорганизации в металлических материалах // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 1. С.88.

7. Хмелевская В.С., Куликова Н.В., Бондаренко В.В. Фрактальные структуры в металлических материалах после ионного облучения и лазерного воздействия // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 14. С. 77.
8. Куликова Н.В., Хмелевская В.С., Бондаренко В.В. Анализ пространственно самоорганизованных структур методами компьютерных технологий // Нелинейный мир. 2007. № 9.
9. Хмелевская В.С., Малышкин В.Г., Куликова Н.В., Бондаренко В.В., Богданов Н.Ю. Фрактальные структуры в облученных металлических материалах // Вопросы атомной науки и техники. 2006. Вып. 1 (66). С. 411.
10. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 363 с.
11. Квастхофф У. Конечные автоматы с вставками: континуальные аспекты дискретных систем // Труды IV международного симпозиума по фракталам в физике. М.: Мир. 1988. 670 с.

Обнинский государственный технический университет атомной энергетики Поступила в редакцию 28.04.2008
 После доработки 8.09.2008

COMPUTER MODELING OF SELF-ORGANIZATION PROCESSES IN IRRADIATED SOLIDS

V.V. Bondarenko

Spatial self-organization structures in the metallic materials after irradiation by laser are studied. General method of the computer analysis of such structures using multi-fractals approaches is described. Founded consistent patterns of the changes of multi-fractals sets in irradiated surface of solids are used for the modeling of the system at the surface of two-dimensional lattice.



Бондаренко Владимир Владимирович – родился в Обнинске (1979), окончил Обнинский государственный технический университет (2002). Аспирант кафедры компьютерные сети, системы и технологии.
 E-mail: blondy_b@mail.ru