

УДК 539.375:622.235

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ НАГРУЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА ХЕРСТА

Чередниченко Алла Валериевна,
аспирант, e-mail: allacherednichenk@rambler.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Исследовано поведение нормированного размаха Херста в ходе эволюции кластерной структуры элементарных повреждений в нагруженных материалах трехмерным вероятностным клеточным автоматом. Установлено, что процесс накопления элементарных повреждений и процесс эволюции кластеров элементарных повреждений являются персистентными случайными процессами. Показано, что появление второго линейного участка на статистике Херста для случайного процесса «число элементарных повреждений» можно интерпретировать как предвестник перехода материала на стадию, непосредственно предшествующую необратимому разрушению.

Ключевые слова: Клеточный автомат, кластеры элементарных повреждений, прогнозирование разрушения, статистика Херста

Прогнозирование разрушения различных материалов является актуальной научной задачей, различные аспекты которой интенсивно исследуются в настоящее время. В качестве неразрушающих методов контроля широко используются методы импульсной эмиссии (акустической, электромагнитной) [1,2]. В настоящее время стоит задача поиска таких параметров эмиссии, которые служили бы надежными предвестниками разрушений. Для прогнозирования разрушения главный интерес представляет пространственное распределение элементарных повреждений и их кластерная структура, тогда как характеристики импульсной эмиссии дают о ней только косвенную информацию [1,2].

На современном уровне развития технологий и, особенно в динамике, одновременное наблюдение потока накопления повреждений и образующей ими кластерной структуры не представляется возможным. Поэтому является актуальным проведение подобного исследования методами компьютерного моделирования.

Согласно современным представлениям твердые материалы, находящиеся под нагрузкой, превышающей предел упругости, представляют собой многоуровневую иерархическую систему дефектов структуры [3], эволюция которой направлена так, чтобы минимизировать внешнее воздействие на всех разномасштабных уровнях, и достигает на предшествующей окончательному разрушению стадии эволюции состояния самоорганизованной критичности [4]. Состояние самоорганизованной критичности характеризуется пространственно-временной масштабной инвариантностью, приводящей к фрактальному пространственному и вре-

менному самоподобию на всех иерархических уровнях. Наличие общих закономерностей процесса разрушения позволяет описать переход на макроскопический уровень без обращения к деталям элементарных актов образования дефектов, опираясь только на геометрические характеристики кластерной структуры повреждений (перколяционные модели). Поскольку случайный процесс накопления повреждений в хрупких материалах является стохастическим, нелинейным и необратимым, адекватной математической моделью для описания этого процесса является модель вероятностного клеточного автомата [5,6].

В работах [6–8] кинетический процесс накопления элементарных повреждений и пространственно-временная эволюция их кластерной структуры в нагруженных материалах исследовались при помощи нового двумерного вероятностного клеточного автомата. Проведенные модельные эксперименты позволили выявить параметры процесса накопления повреждений, характерные для неравновесных систем, склонных к катастрофам. Предложен новый качественный критерий перехода материала на стадию, непосредственно предшествующую разрушению, основанный на изломе нормированного размаха Херста [7] и переходе выборочной временной корреляционной функции в отрицательную область [8].

Однако в действительности развитие повреждений происходит в трехмерной среде, поэтому необходимо дополнительное исследование правомерности применения результатов двумерного моделирования к трехмерным решеткам. Настоящая работа является продолжением работ [6–8] на трехмерный случай.

Для моделирования кинетического процесса накопления повреждений используется решеточная модель, описывающая конфигурацию элементарных повреждений на целочисленной трехмерной решетке. Каждая клетка решетки может находиться в двух состояниях – неповрежденном (свободном) или поврежденном («оккупированном»). Когда элементарные повреждения локализируются на соседних клетках решетки, они объединяются в кластеры, по правилу, определяемому только геометрией решетки. Как и в двумерном случае, работа вероятностного клеточного автомата контролируется набором трех вероятностей: вероятностью образования нового элементарного повреждения на свободном узле решетки (вероятность

структура эволюционирует. Конечной стадией эволюции кластерной структуры считается конфигурация, в которой образуется кластер, соединяющий противоположные грани куба. Образование соединяющего кластера интерпретируется как разрушение системы, а число итераций, необходимых для образования соединяющего кластера, отождествляется со временем до разрушения.

Моделирование проводилось на кубической решетке $100 \times 100 \times 100$. При этом для однородного статического сценария моделирования постоянные вероятности имели следующее значение $p_{occ} = p_{spr} = p_{mer} = 0,001$, а для динамического внутреннего $p_{occ} = 0,0001$, начальное значение

Таблица. Сценарии накопления повреждений.

Сценарий	Вероятности, контролирующие процесс
Однородный статический	Постоянные вероятности оккупации p_{occ} ; прорастания периметра p_{spr} и слияния кластеров p_{mer}
Динамический внутренний	Постоянные вероятности оккупации p_{occ} и слияния кластеров p_{mer} ; зависящая от размера кластера вероятность прорастания периметра $p_{spr}(R) = p_{spr} e^{\frac{\gamma \sigma^4 \sqrt{R^2}}{kT \sqrt{l}}} \quad [6,7]$

оккупации) p_{occ} , вероятностью прорастания периметра кластера повреждений p_{spr} и вероятностью слияния кластеров, сблизившихся на критическое расстояние p_{mer} . Выбор этих вероятностей определяет сценарии моделирования, характеристики которых представлены в таблице.

После выбора сценария моделирования и ввода входных параметров каждая итерация алгоритма генерации случайного процесса накопления повреждений работает в следующей последовательности. На каждой итерации работы автомата сначала образуются повреждения на неповрежденных узлах решетки, проращиваются периметры существующих кластеров; сливаются кластеры, сблизившиеся на критическое расстояние, проводится маркировка кластеров, что формирует кластерную структуру элементарных повреждений на данной итерации.

Конфигурация кластерной структуры на решетке в конечный момент времени задается числом кластеров, а также характеристиками каждого кластера, такими как масса (число элементарных повреждений в кластере), среднеквадратичный радиус, размахи по строкам, столбцам, слоям. На каждой последующей итерации предыдущая кластерная структура заменяется новой кластерной структурой с автоматическим обновлением всех характеристик кластеров, то есть кластерная

вероятности прорастания периметра $p_{spr} = 0,8$, $p_{mer} = 0,2$. Полученные выходные данные усреднялись по 10 реализациям случайного процесса. Пример визуализации соединяющего кластера для динамического внутреннего сценария моделирования приведен на рис.1. При этом на данном рисунке верхняя грань соединена с нижней и левой гранями.

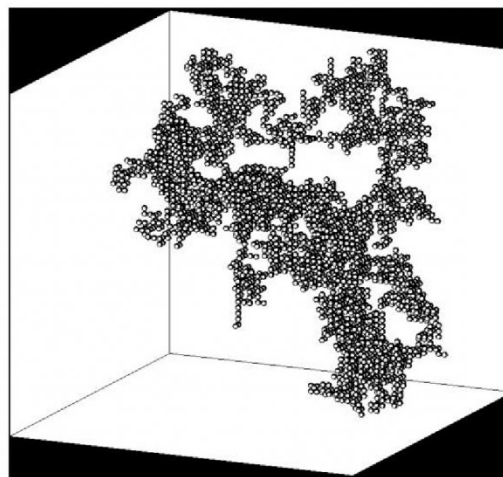


Рис 1. Общий вид кластерной структуры перед разрушением для динамического внутреннего сценария моделирования.

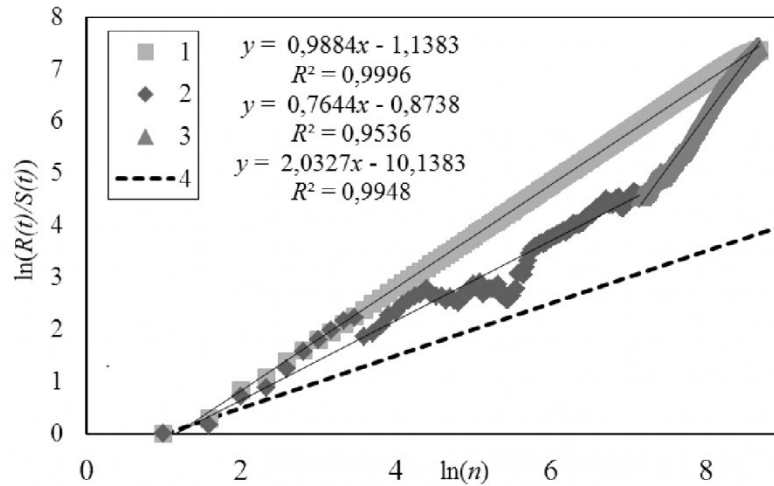


Рис.2. Зависимость нормированного размаха Херста от числа итераций для базового однородного сценария моделирования: 1 – кластеры, 2,3 – элементарные повреждения (первый и второй участки соответственно), 4 – линия, соответствующая значению $H=0,5$

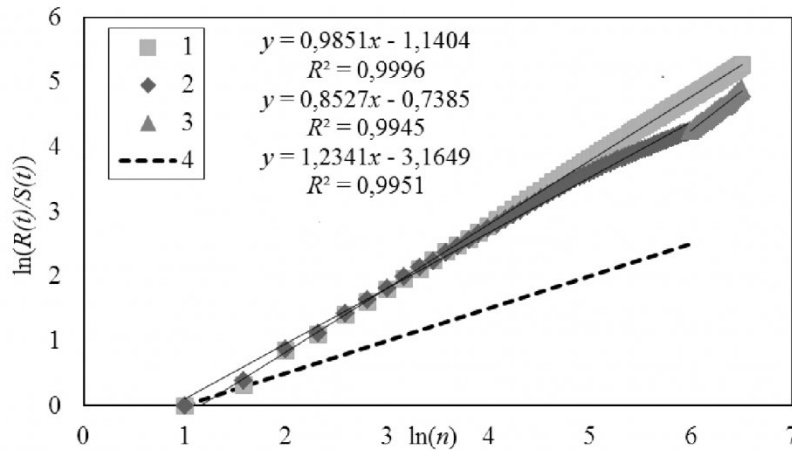


Рис.3. Зависимость нормированного размаха Херста от числа итераций для динамического внутреннего сценария моделирования ($p_{spr} = 0,18$): 1 – кластеры, 2,3 – элементарные повреждения (первый и второй участки соответственно), 4 – линия, соответствующая $H=0,5$

Конфигурация кластеров повреждений имеет фрактальную структуру, которая характеризуется универсальной степенной зависимостью между числом элементарных повреждений в кластере (массой кластера) и его среднеквадратичным радиусом $M(R) = 3^3 R^D$ где $2,305 < D < 2,336$.

Как и в случае двухмерного моделирования, время разрушения определяется в основном вероятностью нового элементарного повреждения на свободном узле. Предельная средняя плотность элементарных повреждений, при которой происходит образование соединяющего кластера, составило $d_{fin} = 0,08 \pm 0,02$ для внутреннего динамического сценария, что в 1,2 ÷ 3 меньше порога

перколяции на кубической решетке, составляющего $d_{fin} = 0,311$ [10].

Для исследования характера случайных процессов широко используется метод нормированного размаха Херста (R/S – анализ) как эффективный тест для проверки того, является ли изучаемый процесс процессом с независимыми приращениями, персистентным или антиперсистентным [7,10]. При этом исходные данные — временные зависимости текущего значения размаха выборки R случайного процесса, нормированного на текущее значение среднеквадратичного отклонения

$$S: R(t)/S(t) \propto |t|^H,$$

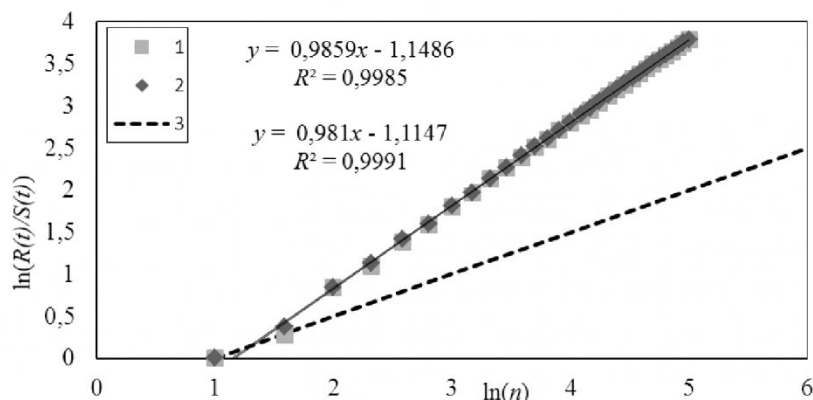


Рис. 4. Зависимость нормированного размаха Херста от числа итераций для динамического внутреннего сценария моделирования ($p_{spr} = 0,22$): 1 – кластеры, 2 – элементарные повреждения, 3 – линия, соответствующая значению. $H = 0,5$

приводят в дважды логарифмических координатах к линейной зависимости $\ln(R/S) \propto H \ln|t|$, угловой коэффициент которой H и называется показателем Херста. Случайному процессу с независимыми приращениями соответствует значение показателя Херста $H=0,5$. Для персистентного случайного процесса (в будущем поддерживается тенденция, которая была в предшествующие моменты времени) значение показателя Херста $H>0,5$. Как и в случае двухмерной модели [7], временные ряды «число элементарных повреждений» и «число кластеров элементарных повреждений» являются персистентными (рис.2-4) для всех рассмотренных сценариев моделирования. На рисунках под временем понимаем число итераций n . При этом для случайного процесса «число кластеров элементарных повреждений» показатель Херста составляет $H = 0,98 \pm 0,01$.

Для случайного процесса накопления элементарных повреждений на временных зависимостях статистики нормированного размаха наблюдается два прямолинейных участка, второй линейный участок, с увеличенным показателем Херста,

начинается на временах, составляющих примерно 60-70 % от времени разрушения системы. Исключение составляет случай, когда начальное значение вероятности прорастания периметра $p_{spr} > 0,2$ (рис.4). Этот режим моделирования приводит к сильной корреляции всех случайных процессов и, как следствие, все линейные зависимости нормированного размаха совпадают.

При этом полученное в ходе моделирования поведение показателя Херста согласуется с особенностями кинетики числа кластеров и характером качественных изменений в поведении корреляционных функций в ходе эволюции [9], а также результатами эксперимента [11]. Поэтому появление второго линейного участка на временной зависимости статистики нормированного размаха в дважды логарифмических координатах можно рассматривать как предвестник перехода системы на стадию, предшествующую разрушению.

Автор благодарит руководителя работы доктора технических наук, профессора Г.А. Казушину и доктора технических наук, профессора Д.В. Алексева за поддержку работы и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куксенко, В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных дефектов // Физика твердого тела. – 2005. – т. 47. – № 5. – с. 788 – 792.
2. Курленя, М.В. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород / М.В. Курленя, А.П. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковичкая. – Новосибирск: Изд – во СО РАН, 2000, 232с.
3. Ботвина, Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
4. Гиляров В.Л. Моделирование роста трещин в процессе разрушения гетерогенных материалов// Физика твердого тела. – 2011. – т.53. – вып.4. – с. 707-710.
5. Бандман, О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики // Системная информатика. Методы и модели современного программирования. – 2006. - №10. С.59-113

6. Алексеев, Д.В. Моделирование кинетики накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом / Д.В. Алексеев, Г.А. Казунина // Физика твердого тела. – 2006. – т.48. – вып.2. – с. 255-261.
7. Алексеев, Д.В. Модельное исследование кинетики накопления повреждений в нагруженных материалах методом нормированного размаха Херста / Д.В. Алексеев, Г.А. Казунина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006.– № 4. – с. 69-74.
8. Алексеев, Д.В. Моделирование кинетики накопления элементарных повреждений в нагруженных материалах. / Д.В. Алексеев, Г.А. Казунина // Деформация и разрушение материалов. – 2009.– № 4. – с. 7-11.
9. Алексеев, Д.В. Кинетика накопления элементарных повреждений в нагруженных материалах: моделирование 3D-вероятностным клеточным автоматом / Д.В. Алексеев, Г.А. Казунина, А.В Чередниченко // Деформация и разрушение материалов. — Москва. —2014. — № 11.
10. Федер, Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991.
11. Алексеев, Д.В. Персистентность накопления трещин при нагружении горных пород и концентрационный критерий разрушения / Д.В. Алексеев, П. В. Егоров // Докл. АН.– 1993.– т.333.– № 6.

Поступило в редакцию 14.05.2015

CELLULAR AUTOMATON SIMULATION THE FRACTURE PREDICATION LOAD MATERIALS WITH THE HURST'S RESCALED RANGE

Cherednichenko Alla Valerievna,
post-graduate mail: allacherednichenk@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

The behavior of the Hurst's rescaled range during evolution of cluster structure of elementary damage in loaded materials is investigated in simulation by the three-dimensional probabilistic cellular automation. It is established that the processes of the damage accumulation and the damage clustering evolution are the persistent random processes. It was shown, the emergence of the second linear portion on the statistics of the normalized Hurst's range of a random process "number of elementary damages" can be interpreted as presage of transition material to the stage preceding destruction.

Key words: cellular automaton, the damage clusters, fracture prediction, Hurst's statistics

REFERENCES

1. Kuksenko, V.S Diagnostics and forecasting of breakage of large-scale objects // Physics of the Solid State.– 2005.–т. 47.– № 5. 788 792 s.
2. Kurlenya, M.V Registration and processing of signals of electromagnetic radiation, of the rock / M.V Kurlenya, A.P Vostretsov G.I Kulakov, G.E Yakovitsky. - Novosibirsk: - in the Russian Academy of Sciences, 2000, 232 s.
3. Botvina, L.R Destruction: kinetics, mechanisms, general laws. - М.: Nauka, 2008.- 334 s.
4. Gilyarov V.L Modelling of growth of cracks in the process of destruction of genetic material hetero-// Physics of the Solid State. - 2011. - т.53. - № 4. 707-710 s.
5. Bandman, O.L Cellular automata models of spatial dynamics // System Informatics. Methods and models of modern programming. - 2006. - №10. S.59-113
6. Alekseev, D.V Simulation of damage accumulation kinetics with a cellular automaton / D.V Alekseev, G.A Kazunina // Physics of the Solid State. - 2006. - т.48. - № 2. 255-261 s.
7. Alekseev, D.V Simulation analysis of the kinetics of damage accumulation process in loaded materials with the Hurst rescaled range / D.V Alekseev, G.A Kazunina //Journal of Mining Science. - 2006. -№ 4. 69-74 s.
8. Alekseev, D.V Simulation the kinetics of damage accumulation in loaded materials. / D.V Alekseev, G.A Kazunina // Deformation and fracture of materials. - 2009.- № 4. 7-11 s.
9. Alekseev, D.V Kinetics of accumulation of damage in elementary loaded materials: simulation 3D - probabilistic cellular automaton. / D.V Alekseev, G.A Kazunina, A.V Cherednichenko // Deformation and fracture of materials. - Moscow. -2014. - № 11.
10. Feder, E. Fractals. - М.: Mir, 1991.
11. Alekseev, D.V Persistence accumulation of cracks during loading and concentration of rock failure criterion / D.V Alekseev, P.V. Egorov // Dokl. AN.- 1993.- т.333.-№ 6.

Received 14.05.2015