

УДК 519.6

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

А.В. Чередниченко, аспирант кафедры математики

Научный руководитель: Г.А. Казунина, д.т.н., доцент, профессор
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

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 образуемой ими кластерной структуры не представляется возможным. Поэтому является актуальным проведение подобного исследования методами компьютерного моделирования. В пользу такого подхода свидетельствует и наличие общих закономерностей на стадии предшествующей разрушению материала [3]. По данным акустического эксперимента микротрещины, например, в горных породах образуются преимущественно на мезоскопическом уровне, и их средний размер находится в пределах $(1.4 - 28.4) \cdot 10^{-6}$ м. Поэтому процесс перехода разрушения на макроскопический уровень может быть описан без обращения к подробностям динамики отдельных элементарных актов, а опираясь только на геометрические характеристики (перколяционные модели) рассматриваемой структуры. 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 [4,5]. В работах [5,6] разработана физическая концепция, математическая модель и комплекс программ для одновременного исследования кинетического процесса накопления повреждений и пространственно-временной эволюции их кластерной структуры в хрупких материалах 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 [6] и переходе выборочной временной корреляционной функции в отрицательную область.

Однако в действительности развитие повреждений происходит в трехмерной среде, и поэтому требуется дополнительное исследование правомерности применения результатов двумерного моделирования к трехмерным решеткам. Настоящая работа является продолжением работ [5,6] на трехмерный случай.

Для моделирования кинетического процесса накопления повреждений используется решетчатая модель, описывающая конфигурацию элементарных повреждений на целочисленной трехмерной решетке. Работа вероятностного клеточного автомата контролируется набором трех вероятностей: вероятностью образования нового элементарного повреждения на свободном узле решетки (вероятность оккупации) p_{occ} , вероятностью прорастания периметра кластера повреждений p_{spr} и вероятностью слияния кластеров, сблизившихся на критическое расстояние p_{mer} . Задание этих вероятностей определяет сценарий моделирования.

В данной работе моделирование проводилось на кубической решетке $100 \times 100 \times 100$ с параметрами $p_{occ} = 0,0001$, начальное значение вероятности прорастания периметра $p_{spr} = 0,18$, $p_{mer} = 0,2$. (динамический внутренний сценарий моделирования). Полученные характеристики случайных процессов усреднялись по 10 реализациям.

После 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 на каждой итерации задается числом кластеров, а также характеристиками каждого кластера, такими как масса (число элементов 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 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 T_{fin} .

Пример визуализации кластерной структуры представлен на рис. 1.

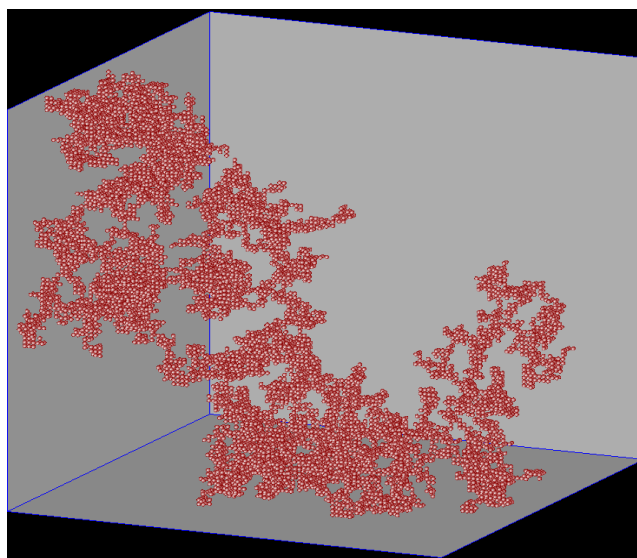


Рис 1. Общий вид кластерной структуры перед разрушением для динамического внутреннего сценария моделирования.

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 $1,2 \div 3$ меньше порога перколяции на кубической решетке, составляющего $d_{fin} = 0,311$ [7].

Эффективным тестом для проверки того, является ли изучаемый процесс процессом с независимыми приращениями, персистентным или антиперсистентным является метод нормированного размаха Херста (R/S — анализ) [6,7]. При этом исходные данные — временные зависимости текущего значения размаха выборки R случайного процесса, нормированного на текущее значение среднеквадратичного отклонения S : $R(t)/S(t) \propto |t|^H$, 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 [6], временные ряды «число элементарных повреждений» и «число кластеров элементарных повреждений» являются персистентными (рис.2,3). На рисунках под временем понимаем число итераций n . При этом

показатель Херста для случайного процесса «число кластеров элементарных повреждений» составляет $H = 0,98 \pm 0,01$. Для случайного процесса «число элементарных повреждений» на статистике нормированного размаха наблюдаются два линейных участка, при этом второй линейный участок, с увеличенным показателем Херста, начинается на временах, составляющих примерно 60-70 % от времени разрушения системы. Исключение составляет случай, когда вероятность прорастания периметра $p_{spr} > 0,2$. Этот режим моделирования приводит к сильной корреляции всех случайных процессов и, как следствие, все линейные зависимости нормированного размаха совпадают.

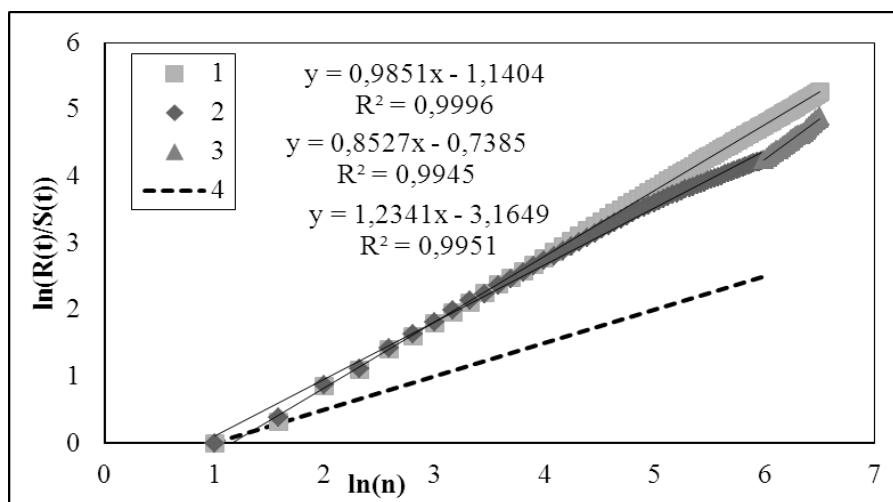


Рис.2. Зависимость нормированного размаха Херста от числа итераций для динамического внутреннего сценария ($p_{spr} = 0,18$) моделирования: 1 – кластеры, 2,3 – элементарные повреждения (первый и второй участки соответственно), 4 – линия, соответствующая значению $H = 0,5$.

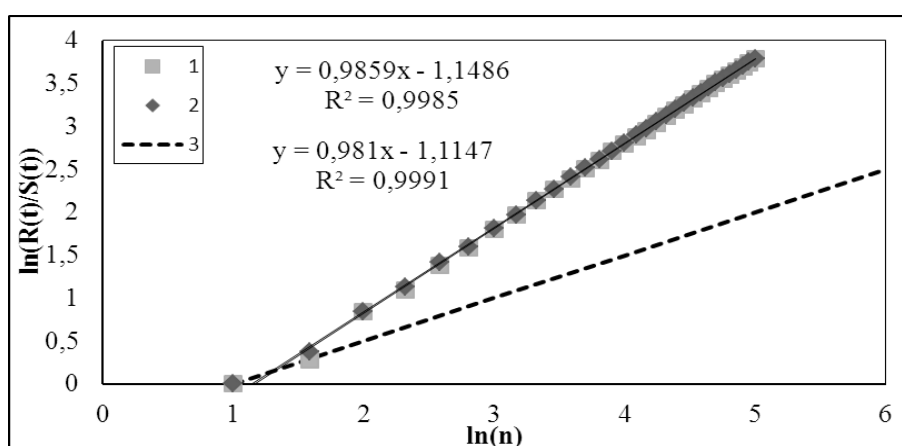


Рис.3. Зависимость нормированного размаха Херста от числа итераций для динамического внутреннего сценария ($p_{spr} = 0,22$) моделирования: 1 – кластеры, 2 – элементарные повреждения, 3 – линия, соответствующая значению $H = 0,5$.

Авторы признательны профессору Алексеву Д.В. за консультации по вопросам программирования.

Список литературы:

1. Куксенко, В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных дефектов / В.С. Куксенко // ФТТ.– 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. Яковицкая. – Новосибирск: Изд – во СО РАН, 2000, 232с.
3. Ботвина, Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л.Р. Ботвина.– М.: Наука, 2008.– 334 с.
4. Бандман, О. Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики / О. Л. Бандман. // Системная информатика. Методы и модели современного программирования. – 2006. - №10. С.59-113
5. 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.
6. Алексеев, Д.В. Модельное исследование кинетики накопления повреждений методом нормированного размаха Херста/ Д.В. Алексеев, Г.А. Казунина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006.– № 4. – с. 69-74.
7. Федер, Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991.