

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДЕСКРИПТОРЫ ВНУТРЕННИХ ГРАНИЦ МАТЕРИАЛА

Гергега А. Н., к.т.н., доц., Выровой В. Н., д.т.н., проф.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина

Явления и процессы на поверхности твёрдых тел, в которых естественным образом проявляются структура и свойства материала, – проверенный индикатор состояния конструкции. Один из таких феноменов – отличающиеся поразительным разнообразием сети поверхностных трещин, которые играют роль внутренних границ материала.

Многочисленные вариации таких сетей поддаются спонтанной визуальной классификации: в их красивых хаотичных и неповторимых рисунках легко угадываются закономерности. Один из возможных способов систематизации полигональных сетей внутренних границ, образующихся при растрескивании поверхности, – по преобладающим углам пересечения [1,2]. Их удобно разделить на два класса: с пересечениями границ под прямым и произвольными углами. Первый из них, в свою очередь, делится на сети с неупорядоченными и ориентированными многоугольниками, причём, сторонами неупорядоченных могут быть как дуги и отрезки прямых, так и ломаные (рис. 1).

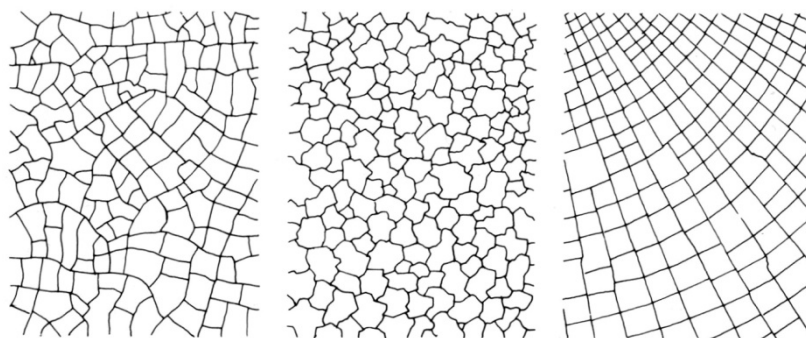


Рис. 1. Сети внутренних границ с хаотизированными и упорядоченными ячейками [2].

Для описания поверхностных трещин можно использовать и метод, основанный на определении технологической поврежденности [3, 4]. Для её оценки вводят коэффициент и альтернативные способы его определения: как отношение общей длины поверхностных трещин к площади поверхности, на которой они проявились, либо как отношение суммарной поверхности трещин в материале к его объёму. Во многих ситуациях такой подход создания относительных коэффициентов разрешает проблему оценки поврежденности, но есть исключения [5]. Например, построенный по некоторой аналогии коэффициент пологости магистральной трещины, определяемый как отношение характерного размера тела к её длине $K_{\text{пмт}} = L_{\text{т}} / L_{\text{тр}}$, не всегда решает задачу: оказывается, что существенно различающиеся визуально трещины имеют одинаковые $K_{\text{пмт}}$. Этот эффект объясняется развитой фрактальностью трещин: именно она нивелирует дескрипторную способность коэффициента [5, 6].

Другие уместные количественные оценки сети внутренних границ и её элементов могут быть найдены при анализе качественных характеристик и количественных параметров статистических распределений трещин и их элементов. Простейшим объектом статистического анализа может быть распределение интерьерных границ материала по размерам, а при исследовании одной из них – распределение участков границы по длине. В этом случае помимо обычных количественных характеристик статистических распределений, могут быть предложены информационные и геометрические параметры:

размерности Реньи, лакуарность и энтропия, показатель разветвленности и связность, корреляционные параметры и другие (табл.1). Цель статьи – рассмотреть некоторые из возможных подходов, основанных на анализе статистических распределений элементов границы раздела, их полиномиальной аппроксимации, и методике, позволяющей оценить уровень упорядоченности элементов границы, с целью получения уникальных идентификаторов (дескрипторов) трещин, установлении, в дальнейшем, корреляции между ними и свойствами материала.

Суть и возможности предлагаемых методов можно продемонстрировать на примере двух одиночных магистральных трещин одинаковой длины, расположенных на поверхности бетона (рис. 2).

Предлагаемые статистические методы основаны на построении и исследовании гистограмм. Необходимые базы данных – это цепочки значений длин участков границ. Для их создания эмпирически подбирается масштаб увеличения фотографии границы раздела, позволяющий проводить измерения.

Статистический анализ массивов данных для трещин на рис. 2, произведённый при коэффициенте надёжности 0.95, показал, что наибольшей дискриминирующей способностью обладает третий момент распределений (степень асимметрии) m_3 : значения отличаются знаком и имеют различие уже в десятых + 0.0048 и – 0.1611. Второй (дисперсия) m_2 и четвёртый m_4 (эксцесс) моменты отличаются лишь во втором знаке после запятой: 8.3351 и 8.3759, – 1.2868 и – 1.2780, соответственно. Кроме того, массивы данных отличаются медианой (5.0 и 4.5), модой (2 и 8), частотой моды (8 и 9), средним отклонением (2.518 и 2.540).

Табл.1.

Некоторые параметры количественного описания трещин

Одиночная трещина	Сеть поверхностных трещин
1. Статистическое распределение по длине	
участков трещины	одиночных трещин сети
2. Количественные характеристики распределения	
<ul style="list-style-type: none"> а). математическое ожидание, б). дисперсия, в). асимметрия, г). островершинность, д). моменты высших порядков 	
3. Качественные характеристики распределения	
<ul style="list-style-type: none"> а). вид, б). степень квазинепрерывности 	
4. Геометрические параметры	
фрактальная размерность	<ul style="list-style-type: none"> а). фрактальная размерность, б). степень анизотропии системы, в). лакуарность, г). показатель разветвленности, д). связность
5. Информационные параметры	
<ul style="list-style-type: none"> а). относительная упорядоченность участков трещины и единичных трещин сети, б). энтропия, в). старшие размерности спектра Реньи 	

Для аппроксимации данных были использованы гауссово, логистическое и распределение экстремальных значений (рис. 3). Максимальные различия в значениях части параметров аппроксимирующих распределений определяются только вторым десятичным знаком: в среднеквадратическом отклонении нормального распределения $s_1 = 2.451$, $s_2 = 2.400$; в параметре масштаба (пропорциональном корню квадратному из дисперсии) логистического $b_1 = 1.351$, $b_2 = 1.323$, в моде и параметре, пропорциональном дисперсии, соответственно, для распределения экстремальных значений $m_1 = 3.238$, $\sigma_1 = 2.232$, $m_2 = 3.242$, $\sigma_2 = 2.285$.

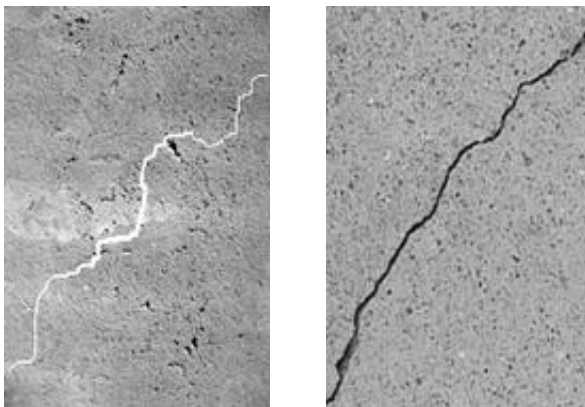


Рис. 2. Поверхностные границы раздела.

Значительно более интересные результаты получены при использовании аппроксимирующих полиномов и сплайновых кривых: существенно отличаются и графики, и значения полиномиальных коэффициентов (рис. 4 и 5).

Другой подход связан с определением относительной степени упорядоченности участков, составляющих внутренние границы.

В [7] показано, что функционал Ляпунова [8]

$$S_1 - S_2 = - \sum_{i=0}^{255} [f_1(i) \ln f_1(i) - f_2(i) \ln f_2(i)] = - \sum_{i=0}^{255} f_1(i) \ln \left(\frac{f_1(i)}{f_2(i)} \right)$$

для элементов двух равновеликих последовательностей данных есть мера относительной степени упорядоченности. Здесь обозначено: S_i – энтропия, f_i – функция распределения данных. (Аналогичный результат известен в теории информации как расстояние Кульбака – Лейблера [9], и является мерой того, насколько различны два вероятностных распределения). Для изучаемых границ раздела величина относительной степени упорядоченности равна $\Delta S = 17.762$, т. е. вторая граница в указанном смысле – более упорядоченная.

Таким образом, значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов и величина относительной степени упорядоченности, а также вид сплайновых кривых обнаруживают себя как эффективные дескрипторы внутренних границ материала.

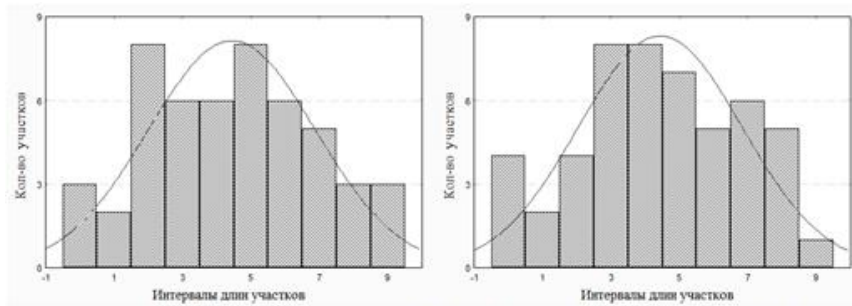


Рис. 3. Распределение участков по длине, аппроксимированное нормальным распределением.

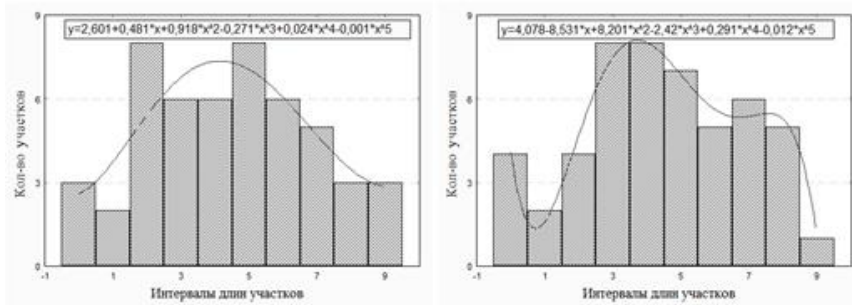


Рис. 4. Аппроксимация шестичленными полиномами.

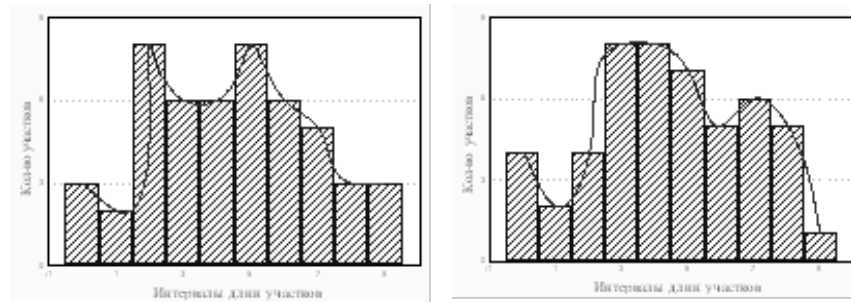


Рис.5. Сплайновые кривые распределений участков по размерам.

SUMMARY

The role of statistical distributions and the degree of ordering by definition of the crack descriptors is shown.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ryan M.P., Sammis C.G. Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt. //Geological Society of America Bulletin. – 1978. – V. 89, No. 9. – P. 1295-1308.
2. Уолкер Дж. Сетки поверхностных трещин. //В мире науки. – 1986. – №12. – С. 158-164.
3. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса, 1998. – 168 с.
4. Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Дорофеев В.С. Размерность коэффициента технологической поврежденности строительных композитов. / Компьютерное материаловедение. – Одесса, 2008. – С. 200.
5. Выровой В.Н., Гергега А.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Трещины в бетоне. /Сб. трудов конференции «Beton Forum UA». – Киев, 2010. – С. 15-17.
6. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
7. Гергега А.Н. Об одном критерии относительной степени упорядоченности изображений. //ЖТФ – 2010. – Т. 80, вып. 5. – С. 149-150.

8. Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. //УФН – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1231-43.
9. Кульбак С. Теория информации и статистика. – М.: Наука, 1967. – 480 с.