

Определение коэффициента формы блоков в иерархии масштабов разрушения углей в мезоскопическом диапазоне 1–1 000 мкм

П.В. Кузнецов, П.В. Макаров, И.В. Петракова, А.А. Трубицын¹,
Н.В. Трубицына¹, С.П. Ворошилов¹, Н.И. Карпенко

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия
Научный центр по безопасности работ в угольной промышленности ВостНИИ, Кемерово, 650002, Россия

Используя фрактальный анализ оптических изображений, определены характерные масштабы поверхностей разрушения углей девяти марок в разных направлениях на мезомасштабном уровне в диапазоне 1–1 000 мкм. Выявлена анизотропия блочной структуры. Получены два коэффициента формы, характеризующие поверхности излома углей на двух масштабных уровнях ΔL_1 и ΔL_2 . Среднее по всем измерениям значение коэффициента формы оказалось равным 2.8.

Determination of block shape factors in scale hierarchy of coal fracture for the mesoscopic range 1–1 000 μm

P.V. Kuznetsov, P.V. Makarov, I.V. Petrakova, A.A. Trubitsyn, N.V. Trubitsyna, S.P. Voroshilov, N.I. Karpenko

Using fractal analysis of light microscopic images of fracture surface of nine coal ranks typical fracture mesoscales in different directions in the range 1–1 000 μm have been determined. Anisotropy of the block structure was revealed. Two block shape factors characterizing the fracture surface of coal at two scale levels ΔL_1 and ΔL_2 were found. The value of shape factor averaged over all measurements is equal to 2.8.

1. Введение

В работе [1] определена иерархия масштабов разрушения угля в диапазоне 1–1 000 мкм, проведенная на основе анализа поведения корреляционной суммы от расстояния между парами точек изображений, усредненной по двум направлениям. При усреднении игнорируется тот факт, что структурные элементы могут иметь неодинаковые размеры в каждом из двух направлений. Как показывает анализ оптических изображений, во многих случаях структурные элементы на поверхности разрушения угля в одном из направлений имеют существенно больший размер, т. е. являются удлиненными или имеют форму ламелей. Таким образом, представляется целесообразным исследовать коэффициент формы блоков, наблюдаемых на поверхности разрушения углей.

Определение коэффициента формы важно также и для проверки выполнения критерия универсальной делимости [2–5] геоматериалов и геосред применительно к углю. Согласно мнению Е.И. Шемякина [2], заметное отклонение отношения размеров двух последовательных блоков от значения $L_{n+1}/L_n \approx 3$ свидетельствует о

том, что блоки не являются компактными, когда все три размера приблизительно равны. По этому отклонению можно судить об удлиненности блока в одном из направлений, то есть о коэффициенте формы блока.

2. Методика измерения коэффициентов формы блоков

Для изучения анизотропии блочной структуры поверхностей разрушения угля использовали методику [6], основанную на фрактальном анализе оптических изображений их поверхности. Для этого при съемке изображений образцы располагали таким образом, чтобы продольная ось структурных элементов поверхностей разрушения была ориентирована вдоль горизонтальной оси изображений. Расчет корреляционной суммы проводился в три этапа: вдоль изображения, поперек изображения и усреднением по направлениям. Рассчитанные значения корреляционных сумм использовали для построения их зависимостей от расстояния между парами точек в дважды логарифмических координатах и для нахождения фрактальных размерностей и соответст-

вующих им длин корреляций. Основная идея методики состоит в том, что средняя разность яркости, приходящаяся на пару пикселей изображения, является его статистической характеристикой, которая скейлинговым образом зависит от расстояния между парами точек. Таким образом, длина корреляции, получаемая с помощью этой методики, физически означает интервал линейных размеров, в котором поверхность разрушения характеризуется одинаковыми статистическими свойствами.

Для оценки коэффициента формы блоков поверхностей разрушения углей использовали отношение верхних границ длины корреляции вдоль и поперек изображений для первого (ΔL_1) и второго (ΔL_2) участков поведения корреляционной суммы. Таким образом, были получены два коэффициента формы $K_1 = L_{\max 1}^{\parallel} / L_{\max 1}^{\perp}$ и $K_2 = L_{\max 2}^{\parallel} / L_{\max 2}^{\perp}$, характеризующие поверхности излома углей на двух масштабных уровнях ΔL_1 и ΔL_2 . Здесь $L_{\max 1}^{\parallel}$, $L_{\max 2}^{\parallel}$ — верхние границы длин корреляций на первом и втором участках поведения корреляционной суммы, подсчитанной вдоль изображений, а $L_{\max 1}^{\perp}$, $L_{\max 2}^{\perp}$ — соответствующие вели-

чины для корреляционной суммы, подсчитанные поперек изображений.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, 2 приведены изображения поверхностей разрушения угля двух марок (ГНС и Г) и зависимости корреляционных сумм от расстояния между парами точек, подсчитанные вдоль и поперек изображения и усредненные по направлениям.

Видно, что во всех случаях зависимости имеют три участка поведения корреляционной суммы, причем наклон прямых линий, подогнанных к экспериментальным точкам на первом и втором участках, а также верхние границы названных участков $L_{\max 1}$, $L_{\max 2}$ зависят от направления, в котором проводится подсчет корреляционных сумм. Видно, что значения $L_{\max 1}^{\parallel}$, $L_{\max 2}^{\parallel}$ для направления вдоль изображения больше соответствующих значений $L_{\max 1}^{\perp}$, $L_{\max 2}^{\perp}$ для направления поперек изображения. Усредненные по направлениям значения $L_{\max 1}$ и $L_{\max 2}$ занимают промежуточные положения.

В таблице 1 приведены средние значения результата обработки 5–7 изображений для образцов угля разного

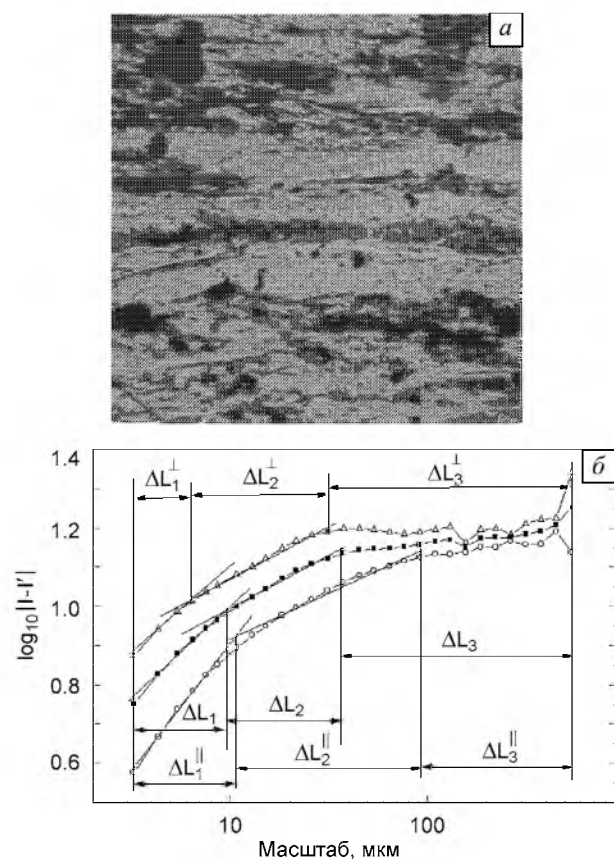


Рис. 1. Изображение поверхности разрушения угля марки ГНС (а) и зависимости корреляционных сумм от расстояния между парами точек вдоль (○), поперек (△) и усредненная по направлениям изображения (■) (б) (таблица 1 — тип 2)

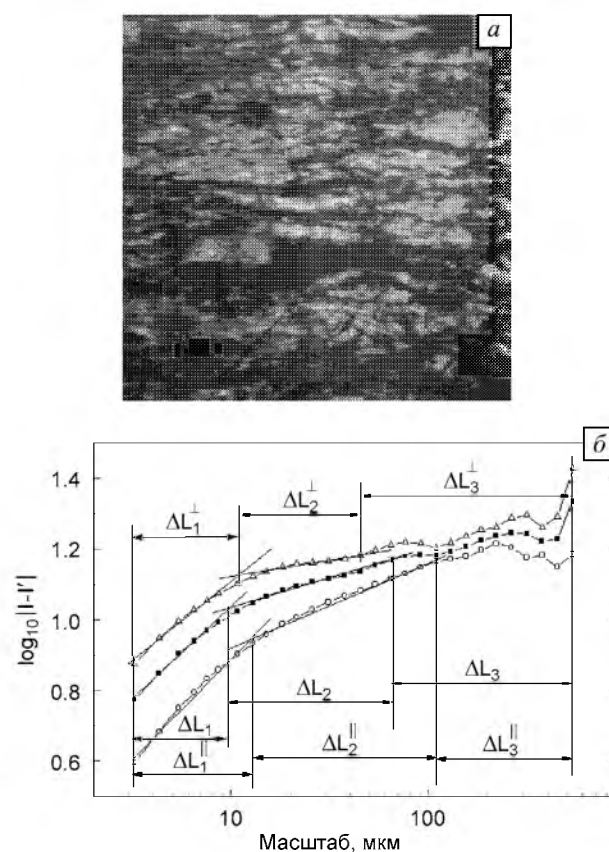


Рис. 2. Изображение поверхности разрушения угля марки Г (а) и зависимости корреляционных сумм от расстояния между парами точек вдоль (○), поперек (△) и усредненная по направлениям изображения (■) (б) (таблица 1 — тип 3)

Таблица 1

Результаты фрактального анализа изображений поверхностей разрушения угля разных марок вдоль и поперек изображений

Тип	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Марка	Т	ГНС	Г	Г	Г	Д	ДГ	Ж	ОС
$L_{\max 1}^{\parallel}$, мкм	45 ± 10	14 ± 2	13 ± 2	11 ± 2	32 ± 8	59 ± 24	25 ± 4	25 ± 4	28 ± 2
$L_{\max 2}^{\parallel}$, мкм	179 ± 35	104 ± 22	128 ± 50	157 ± 97	250 ± 68	167 ± 31	252 ± 39	194 ± 44	246 ± 69
$L_{\max 1}^{\perp}$, мкм	15 ± 3	8 ± 1	9 ± 2	10 ± 1	11 ± 1	13 ± 2	12 ± 3	19 ± 2	11 ± 1
$L_{\max 2}^{\perp}$, мкм	122 ± 25	39 ± 13	46 ± 8	58 ± 16	52 ± 5	85 ± 23	53 ± 10	75 ± 6	92 ± 36
$L_{\max 1}^{\text{CP}}$, мкм	18 ± 3	12 ± 5	10 ± 2	12 ± 1	18 ± 3	18 ± 1	20 ± 4	22 ± 2	15 ± 1
$L_{\max 2}^{\text{CP}}$, мкм	137 ± 38	67 ± 38	64 ± 27	77 ± 14	76 ± 20	129 ± 23	258 ± 79	138 ± 38	180 ± 54
$\frac{L_{\max 2}^{\parallel}}{L_{\max 1}^{\parallel}}$	4.0	7.6	9.8	13.7	7.9	2.8	10.1	7.9	8.8
$\frac{L_{\max 2}^{\perp}}{L_{\max 1}^{\perp}}$	8.0	4.7	5.1	6.0	4.9	6.5	4.4	4.0	8.7
$K_1 = \frac{L_{\max 1}^{\parallel}}{L_{\max 1}^{\perp}}$	3.0	1.7	1.5	1.2	3.0	4.5	2.1	1.3	2.6
$K_2 = \frac{L_{\max 2}^{\parallel}}{L_{\max 2}^{\perp}}$	1.5	2.7	2.8	2.7	4.8	2.0	5.2	2.6	2.7

типа. В двух нижних строчках приведены коэффициенты формы блоков K_1 и K_2 для двух масштабных уровней ΔL_1 и ΔL_2 . Проведенные исследования углей разных марок показали, что надежно выделяются два характерных масштаба поверхностей разрушения для направлений вдоль и поперек образца в диапазоне $L_1 \sim 8-44$ и $L_2 \sim 45-250$ мкм. В некоторых случаях наблюдается третий характерный масштаб в диапазоне $L_3 \sim 250-400$ мкм (не приведено в таблице). Так как третий масштаб из-за низкой статистической точности надежно не выявлен, то в дальнейшем в настоящей статье он не обсуждается.

Следует также отметить определенную ограниченность данных наблюдений. Программное обеспечение оптико-измерительного комплекса аппроксимирует зависимости корреляционных сумм от расстояния между парами точек только двумя прямыми, хотя поведение корреляционных сумм (рис. 1, 2, б) ясно показывает, что в ряде случаев характерных масштабов должно быть больше, чем два (три-пять). Действительно, из таблицы 1 следует, что для угля марки Т (первый столбец таблицы) отношение $L_{\max 2}^{\parallel}/L_{\max 1}^{\parallel} \approx 4$, а $L_{\max 2}^{\perp}/L_{\max 1}^{\perp} \approx 8$, то есть, если следовать критерию универсальной делимости, один масштаб оказался пропущенным. Для марки ГНС (второй столбец таблицы) наблюдается обратная картина — «пропущен» масштаб для $L_{\max 2}^{\parallel}/L_{\max 1}^{\parallel} \approx 8$, в то время как отношение $L_{\max 2}^{\perp}/L_{\max 1}^{\perp} \approx 4.5$. Аналогично для последних трех типов углей марки ДГ, Ж и ОС

не выявлен возможный в ряду делимости масштаб в диапазоне 70–80 мкм.

Заметим, что потенциально возможные блоки на каждом конкретном изломе могут остаться не выявленными вследствие низкой статистики. С учетом вышесказанного, проведенная в работе оценка коэффициентов формы блоков рассматривается авторами как предварительная. В настоящее время ведется работа по созданию универсальной программы обработки оптических изображений и выделения характерных масштабов разрушения.

Как видно из таблицы 1, величина коэффициентов формы блоков для угля разных марок изменяется в достаточно широком диапазоне значений от 1.2 до 5.2. Наиболее часто наблюдается значение коэффициентов формы блоков, лежащее в пределах 2.6–3.0. Очень важно отметить, что усреднение по восьми значениям K_1 и K_2 дает величину 2.8. Среднее по всем значениям в двух колонках K_1 и K_2 дает величину 2.7. Величина коэффициентов формы в пределах 2.6–3.0 часто наблюдается для одного из двух мезомасштабных уровней ΔL_1 или ΔL_2 , в то время как для второго масштабного уровня коэффициент формы существенно меньше и лежит в пределах 1.2–1.7. Только в одном случае значения K_1 и K_2 для двух мезомасштабных уровней ΔL_1 или ΔL_2 оказались фактически равными между собой и близки к средней величине 2.8 (последний столбец таблицы 1, марка ОС).

Таким образом, полученные данные указывают на периодическую структурную организацию поверхностей разрушения углей, которая проявляется в виде образования элементов кратного размера вдоль различных направлений.

В работе [2] на основании равенства накопленной потенциальной энергии деформации в объеме (A) и удельной поверхностной энергии разрушения (γ) введен в рассмотрение характерный линейный масштаб разрушения $D_{кр} = \gamma/A$, где $D_{кр}$ — критический размер области, в которой запас накопленной потенциальной энергии достаточен для образования новой поверхности. Как показано в [2], размер тела R , отделяемого от основного объема с простейшими формами (например, шар, куб, цилиндр), должен превосходить первоначальный критический размер предыдущего уровня в три раза, т.е. $R \approx 3\gamma/A \approx 3D_{кр}$. Например, шар имеет запас упругой энергии деформации $4/3 \pi R^3 A$, при свободном разрушении новая поверхность образуется по сфере $4\pi R^2 \gamma$, отделяющей шар от остальной среды. Так как $4\pi R^2 \gamma = 4/3 \pi R^3 A$, то $\gamma/A = d = 4/3 \pi R_*^3 / 4\pi R_*^2$ и $R_* = 3d$. Таким образом, только в шаре критического радиуса R_* запасается потенциальная энергия, достаточная для образования новой поверхности и этот радиус в три раза превосходит критический размер предыдущего уровня. Индукция по этому процессу позволяет продвигаться вверх по иерархической лестнице [3]. Поразительно, что средний коэффициент формы блоков угля также оказался практически равным универсальной постоянной делимости твердых тел $\sim 2.7-3.0$.

Такое же значение отношения размеров для последовательности блоков получено в рамках концепции концентрационного критерия укрупнения трещин [7]. В соответствии с этой концепцией слияние более мелких повреждений в магистральную трещину будет происходить тогда, когда отношение среднего расстояния между трещинами к характерному среднему размеру трещины достигнет некоторой критической величины. Согласно многочисленным данным эта критическая величина является универсальной для всей иерархии масштабов и близка к трем. Этот процесс определяет размер следующего блока в иерархии. Таким образом

концепция концентрационного критерия укрупнения трещин [7] приводит к такому же результату, что и анализ, проведенный в работе [2].

4. Заключение

Таким образом, измерения коэффициента формы показывают, что уголь как типичный представитель геоматериала имеет блочную иерархическую структуру. При его разрушении образуются блоки, удовлетворяющие принципу универсальной делимости геоматериалов и геосред, впервые предложенному В. В. Пиотровским и М. А. Садовским [5, 6]. Даже в том случае, когда образуются блоки удлиненной формы, средний коэффициент формы оказался равным универсальной постоянной делимости твердых тел $\sim 2.7-3.0$. Это означает, что средний удлиненный элемент содержит три компактных блока.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке моделей усредненного поведения геоматериалов и геосред, имеющих блочное строение, а также для разработки методик расчета распределения пылевых частиц по их характерным размерам и форме.

Литература

1. Макаров П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Кузнецов П.В., Петракова И.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Ворошилов С.П. Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения углей и расчет выхода пылевых частиц. I. Исследование иерархии масштабов разрушения // Физ. мезомех. — 2004. — Т. 7. — Спец. вып. — Ч. 2. — С. 245–248.
2. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН. — 1988. — Т. 300. — С. 1090–1094.
3. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 423 с.
4. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
5. Пиотровский В.В. Использование морфометрии для изучения рельефа и строения Земли // Земля во Вселенной. — М.: Мысль, 1964. — С. 278–297.
6. Кузнецов П.В., Оксогоев А.А., И.В.Петракова. Фрактальный анализ изображений поверхности обработанных дробью поликристаллов алюминия при активном растяжении и их усталостная прочность // Физ. мезомех. — 2004. — Т. 7. — № 2. — С. 49–57.
7. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Можно ли прогнозировать разрушение? // Будущее науки. — М.: Знание, 1983. — С. 99–107.