

PACS: 61.43.Hv

В.В. Пашинский

## ФРАКТАЛЬНАЯ ПРИРОДА СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В СПЕЧЕННЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ

Донецкий национальный технический университет  
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83000, Украина

Статья поступила в редакцию 29 октября 2008 года

*Исследованы особенности структуры твердых сплавов на основе карбида вольфрама. Установлено, что структура характеризуется наличием иерархической неоднородности, степень которой возрастает с увеличением скорости процесса формообразования. Неоднородная иерархическая структура обладает фрактальными свойствами, при этом фрактальная размерность исследованных материалов изменяется в пределах 1.38–2 и является количественной оценкой неоднородности. Возрастание значения размерности свидетельствует о повышении однородности структуры. Первичным элементом иерархии является конгломерат карбидных частиц, поэтому оценить степень неоднородности можно по размеру и доле конгломератов в структуре. Установлено, что с возрастанием их доли до 20–22% прочностные свойства исследованных материалов снижаются на 35–40%.*

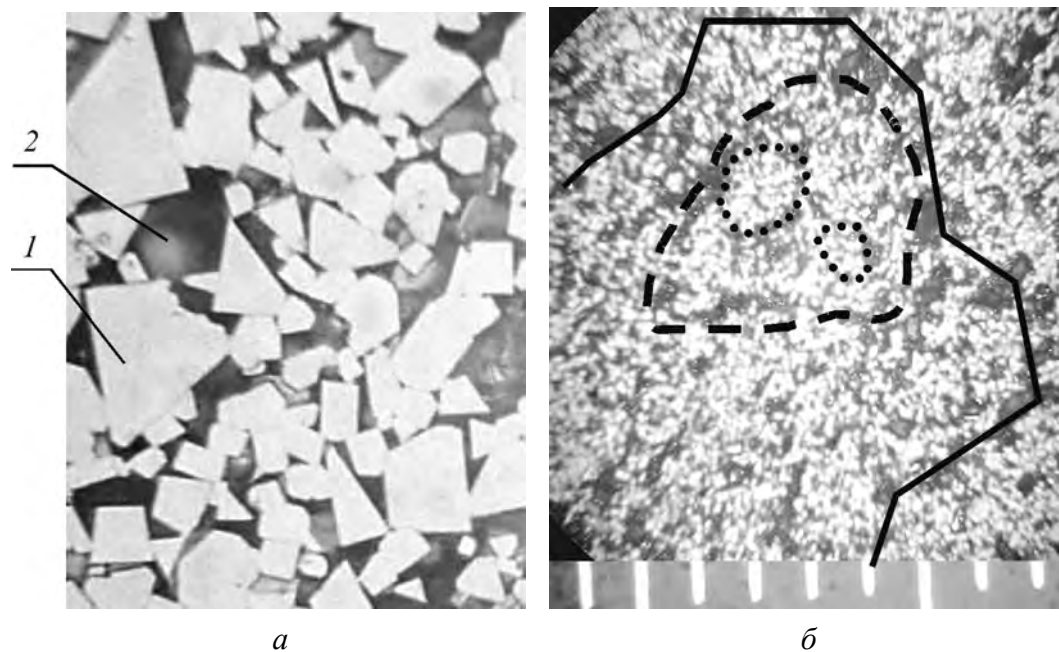
Определение количественных характеристик структуры является актуальной задачей при проведении исследований, направленных на совершенствование существующих и разработку новых материалов. Численные значения структурных параметров используются для разработки критериев оценки структуры и отыскания зависимостей, связывающих структуру и свойства материала. Основы методов количественной металлографии, позволяющие определить такие параметры структуры, как соотношение фаз, размеры участков фаз и стереологические характеристики их взаимного расположения, изложены в работах [1–3]. Развивая указанный подход, авторы работ [4–6] установили, что структура реальных материалов имеет иерархическую организацию на различных масштабных уровнях и комплекс свойств материала зависит от степени проявления этой организации.

Целью настоящей работы являлось развитие методов количественной оценки структуры твердых сплавов на основе карбида вольфрама с кобальтовой и кобальто-никелевой связками. Такие оценки необходимы для получения количественных критериев оптимизации структуры и свойств материалов. Для достижения поставленной цели с использованием методик количественной металлографии проведены исследования структуры твердых

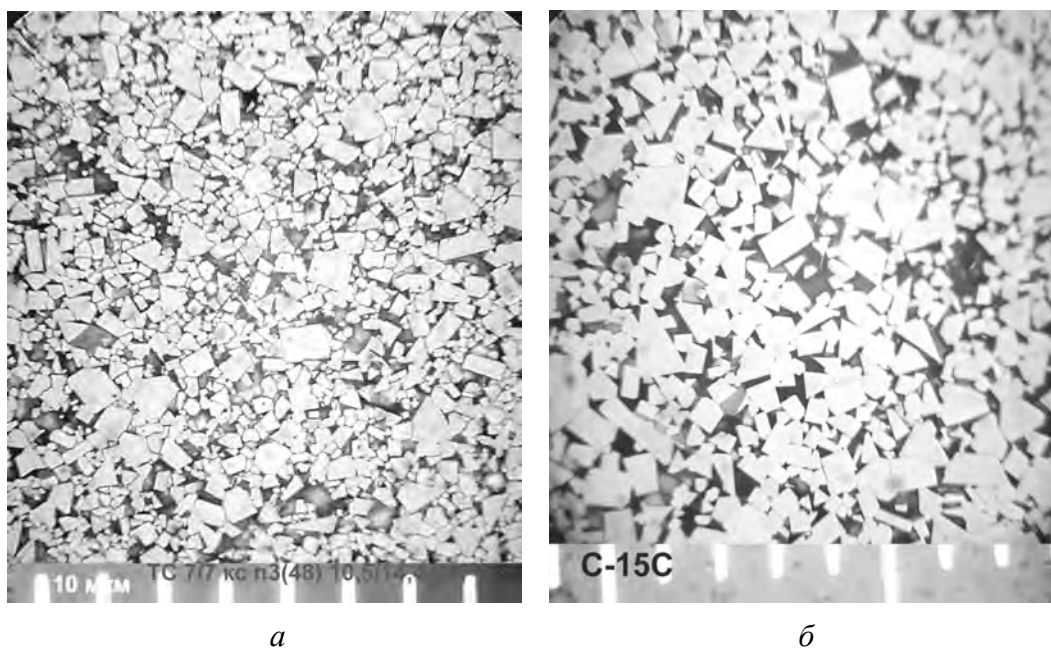
сплавов, полученных методами вакуумного спекания (ВС), горячего изостатического прессования (ГИП), ускоренного (УГВП) и традиционного горячего вакуумного прессования (ГВП). На основании полученных данных была проведена оценка степени развития неоднородности микроструктуры сплавов.

Требования к структуре твердых сплавов и методы ее оценки в производственной практике регламентируются ГОСТ 9391–67, который был разработан в то время, когда эти сплавы применялись главным образом для изготовления режущего инструмента. Основными показателями гетерогенности структуры в соответствии со стандартом служат наличие либо отсутствие в структуре аномально-крупных зерен или участков связки. При этом оценка является практически качественной («наличие–отсутствие»). Систематическое изучение микроструктуры крупногабаритных твердосплавных изделий, выполненное в данной работе, показало, что для эффективного анализа взаимосвязи структуры и свойств необходимо введение дополнительных характеристик. Типичные структуры приведены, в частности, на рис. 1. На изображениях структур в той или иной степени выявляется гетерогенность нескольких масштабных уровней, в частности:

- первого – базовые элементы структуры (зерна и участки связки) с характерным размером 1–5  $\mu\text{m}$  (рис. 1,*а*);
- второго – конгломераты зерен с размером 5–10  $\mu\text{m}$  (рис. 1,*б*);
- третьего – скопления конгломератов, разделенные протяженными участками связки с размером более 30  $\mu\text{m}$  (рис. 1,*б*).



**Рис. 1.** Иерархическая неоднородность в сплавах с 15% связки: *а* – первого уровня – базовые элементы структуры (*1* – зерна карбида, *2* – связка), *б* – второго (····), третьего (---) и четвертого (—) уровней (цена деления линейки 10  $\mu\text{m}$ )



**Рис. 2.** Структура сплава ВК15: *a* – неоднородная структура с наличием конгломератов зерен (метод ГВП); *б* – однородная структура без конгломератов зерен (метод ГИП)

Скопления конгломератов (третий уровень неоднородности) в некоторых случаях имеют тенденцию к объединению в группе следующего (четвертого) уровня (рис. 1, *б*). Наиболее часто указанная особенность наблюдается в материалах, полученных методом УГВП. Склонность к формированию такой неоднородности снижается с увеличением среднего размера карбидных зерен и с переходом к технологиям, протекающим в более равновесных условиях, – ГИП и ВС. На рис. 2 показаны примеры структур, в которых наблюдается только первичная гетерогенность (на уровне отдельных зерен) или двухуровневая (зерна и конгломераты).

Для количественной оценки структур с масштабной иерархией в современном материаловедении используется метод фрактальных размерностей [7]. Теоретические и методические аспекты определения фрактальной размерности рассмотрены в [8–10]. Основное уравнение, связывающее размерный и масштабный факторы, имеет вид [10]:

$$M^D = N$$

или в случае дискретного разбиения плоскости на ячейки с размером  $L$

$$(1/L)^D = N,$$

где  $M$  – увеличение, при котором изучается структура;  $D$  – фрактальная размерность;  $N$  – число наблюдаемых элементов структуры;  $L$  – размер ячейки сетки, полностью покрывающей объект.

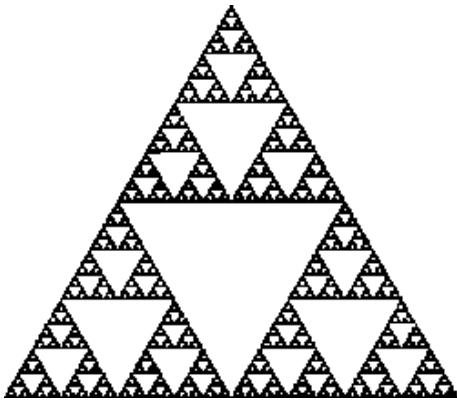


Рис. 3. Иерархический фрактал, получаемый разбиением площади фигуры на подобные фигуры меньшего размера [10]

В структурах, представленных на рис. 1, наблюдаемый тип неоднородности близок к известному [10] точному фракталу типа «салфетка Серпинского» (рис. 3). Он формируется последовательным разбиением площади геометрической фигуры на подобные фигуры меньшего размера. Размерность фрактала такого типа определяется как отношение числа фигур  $n$ , формируемых на каждом шаге, к характерному размеру получаемой фигуры  $d$ .

В данном случае  $D = \frac{\ln n}{\ln d} = \frac{\ln 3}{\ln 2} \approx 1.5849$ .

Очевидно, что структуры, приведенные на рис. 1, 2, не являются точными фракталами и их размерность будет иной.

Число вложенных фигур для структур, показанных на рис. 1, б, на каждом шаге разбиения составляет 3–4, т.е. пропорционально  $3^k - 4^k$ , а размер фигуры уменьшается в 1.6–2.2 раза, т.е. пропорционален  $1.6^{-k} - 2.2^{-k}$ , где  $k$  – номер шага разбиения. Количественная оценка размерности структур на рис. 1 дает значение  $D = 1.38 - 2.32$ . Эта оценка является приближенной. Очевидно, что для двумерных объектов, к которым относятся изображения микроструктур, максимальное значение размерности  $D = 2$  и величина экспериментальных размерностей, превышающая 2, являются следствием неточности измерений. Для получения статистически достоверных значений необходимо накопление большого массива измерений. Это представляет отдельную задачу и выходит за рамки настоящего исследования. В данном случае больший интерес представляет физическая трактовка фрактальной размерности применительно к оценке неоднородности структуры.

Известно, что физические фракталы, в отличие от алгебраических, существуют только в определенном диапазоне характерных размеров  $d$ . Для спеченного твердого сплава  $d_{\min}$  не может быть меньше размера карбидной частицы (порядка  $10^{-6} - 10^{-5}$  м), а  $d_{\max}$  не может превышать размеров изделия (порядка  $10^{-1}$  м). Если частицы распределены абсолютно однородно, то наблюдаемое количество частиц на площади шлифа квадратично возрастает с ростом линейного размера площади наблюдения, т.е. фрактальная размерность объекта  $D = 2$ . В литературе [7–10] показано, что при образовании сложных упорядоченных иерархических структур фрактальная размерность снижается и может достичь  $D = 1$ . Поэтому можно предположить, что, чем ближе экспериментально определенное значение  $D$  к величине 2, тем менее выявлена иерархичность в структуре и тем выше однородность распределения частиц. Этот вывод совпадает также с получаемым при анализе так называемых «броуновских фракталов». Размерность траектории хаотического

броуновского движения частицы на плоскости близка к 2, тогда как упорядоченные линии (например, «снежинка Коха») имеют размерности меньше 2.

Простой алгоритм определения фрактальной размерности можно получить, реализуя последовательный подсчет числа пересекаемых объектов  $n$  при линейном количественном анализе с разным расстоянием между линиями сканирования  $d$ . Однако, основываясь на постулате о самоподобии фрактала, т.е. о независимости его геометрических характеристик от масштаба измерения, для оценки однородности структуры можно ограничиться анализом соотношения двух иерархических уровней – элементарного («частица») и первого («конгломерат»), либо следующего – «конгломерат»–«скопление конгломератов». Нами разработана методика определения наличия конгломератов в структуре сплава [11]. Эта методика была использована для количественной оценки структуры образцов, изготовленных по технологии ГВП. В процессе отработки технологии изменяли режимы подготовки смеси к прессованию и температурно-деформационный режим прессования.

На рис. 4 приведен график зависимости временного сопротивления изгибу от доли конгломератов зерен в структуре материала. При этом средний размер единичной частицы составлял 2–2.5  $\mu\text{m}$ , средний размер конгломерата – 9–10  $\mu\text{m}$ , среднее число частиц в конгломерате – 12–15, т.е. размерность  $D = 1.8$ –1.9. Поскольку частицы в конгломерате расположены достаточно однородно, размерность фрактала на этом уровне близка к 2. При переходе же на следующий уровень неоднородности (см. рис. 1) число конгломератов внутри одного участка составляет 5–7, а размер участка увеличивается до 30–35  $\mu\text{m}$ , что приводит к уменьшению размерности до значений  $D < 1.5$ . При переходе к более высокому уровню неоднородности фрактальная размерность остается значительно ниже 2.

В результате проведенных исследований установлено, что структура твердых сплавов на основе карбида вольфрама характеризуется наличием иерархической неоднородности, степень проявления которой возрастает при использовании процесса УГВП по сравнению с более длительными равновесными процессами ГИП, ВС, ГВП. Неоднородная иерархическая структура

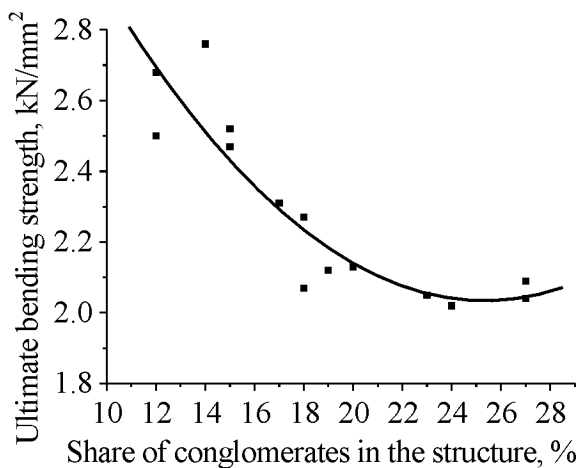


Рис. 4. Зависимость временного сопротивления изгибу сплава ВК15, полученного методом ГВП, от доли конгломератов в структуре

обладает фрактальными свойствами, при этом фрактальная размерность исследованных материалов изменяется в пределах 1.38–2 и служит количественной оценкой неоднородности. Возрастание значения размерности свидетельствует о повышении однородности структуры. Первичным элементом иерархии является конгломерат карбидных частиц, поэтому оценить степень неоднородности можно по размеру и доле конгломератов в структуре. Установлено, что с возрастанием их доли до 20–22% прочностные свойства исследованных материалов снижаются на 35–40%.

1. С.А. Салтыков, Стереометрическая металлография. Стереологический анализ материалов, Металлургия, Москва (1976).
2. К.С. Чернявский, Стереология в металловедении, Металлургия, Москва (1977).
3. И.Н. Чапорова, К.С. Чернявский, Структура спеченных твердых сплавов, Металлургия, Москва (1975).
4. В.С. Иванова, А.С. Баланкис, А.А. Оксогоев, Синергетика и фракталы в материаловедении, Наука, Москва (1994).
5. В.С. Иванова, А.В. Корзинников, Металлы № 1, 103 (2002).
6. В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев, Структурные уровни деформации твердых тел, Наука, Новосибирск (1985).
7. В. Mandelbrot, The Fractals Geometry of Nature, Freeman, San Francisco, № 4 (1982).
8. М.Ю. Яблоков, Физическая химия № 2, 73 (1999).
9. В.К. Балханов, Введение в теорию фрактального исчисления, Изд-во Бурятского гос. ун-та, Улан-Удэ (2001).
10. Е. Федер, Фракталы, Мир, Москва (1991).
11. В.В. Пашинский, ФТВД **18**, № 1, 101 (2008).

V.V. Pashinsky

## FRactal Nature of Structural Nonuniformity in Sintered Hard Alloys

Peculiarities of structure of hard alloys on tungsten carbide base were investigated. It is established that hierarchic nonuniformity takes place in the structure. Degree of nonuniformity increases with velocity of shape-forming process. Nonuniform hierarchic structure has fractal properties and for investigated materials the fractal dimension varies in the range 1.38–2. It is the quantitative evaluation of nonuniformity. Dimension value increase is the evidence of uniformity increasing. Conglomerate of carbide particles is the basic element of hierarchy, therefore its size and volume fracture in the structure may be used for evaluation of nonuniformity. It is established that strength properties of investigated materials decrease by 35–40% with conglomerate fracture increase up to 20–22%.

**Fig. 1.** Hierarchic nonuniformity in alloy with 15% binder: *a* – of the first level – basic structure elements (*1* – carbide grains, *2* – binder), *b* – second (⋯), third (– – –) and fourth (—) levels (rule scale division 10 μm)

**Fig. 2.** Structure of alloy BK15: *a* – nonuniform structure with grain conglomerates (method of hot vacuum pressing (HVP)); *b* – uniform structure having no grain conglomerates (method of hot isostatic pressing)

**Fig. 3.** Hierarchic fractal – the result of figure area subdivision into similar ones of smaller size [10]

**Fig. 4.** Dependence of ultimate bending strength for HVP-alloy BK15 on share of conglomerates in the structure