

05;11;12

Фрактальные характеристики поверхностей деформации композиционного материала и их связь со структурой

© И.Н. Севостьянова, С.Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 20 июля 1998 г.

Исследован деформационный рельеф, возникающий на поверхности твердого сплава при активной деформации, и определены его фрактальные свойства. Установлена взаимосвязь между фрактальной размерностью профиля поверхности и параметрами тонкой кристаллической структуры материала.

Известно, что при деформации материалов на его поверхности возникает деформационный рельеф, который является результатом изменений, протекающих на различных структурных уровнях [1], и может быть охарактеризован фрактальной размерностью [2]. Перспективным способом исследования фрактальных свойств поверхностей деформации является измерение фрактальной размерности с помощью растрового электронного микроскопа [3]. Однако однозначных данных о взаимосвязи фрактальных свойств подобного рельефа и изменений внутренней структуры материала нет.

Целью данной работы является изучение фрактальных характеристик поверхности деформируемого твердого сплава и установление такой взаимосвязи между параметрами его тонкой кристаллической структуры и образующимся на поверхности деформационным рельефом.

В качестве объекта исследования выбран твердый сплав, содержащий карбид вольфрама, в качестве матрицы которого использовалась железо-марганцевая сталь. Технология получения твердого сплава описана в работе [4]. Нагружение образцов твердого сплава сжатием проводилось на образцах в виде параллелепипедов размером $4 \times 4 \times 5.5$ mm на установке "INSTRON-1185" со скоростью 0.05 mm/s. Нагрузка осуществлялась ступенями через 250 МПа, после каждой степени нагружения образец

разгружали и проводили исследование боковой поверхности. Для изучения кристаллической структуры использован рентгеноструктурный анализ, проведенный на рентгеновском дифрактометре ДРОН-УМ1, с фильтрованным железным излучением. Анализ рельефа деформируемой поверхности проводился на растровом электронном микроскопе РЭМ-200 с ускоряющим напряжением 30 kV. Определялась фрактальная размерность сигнала вторичных электронов, эмитированных поверхностью исследуемого объекта. Для исследования изображения участков поверхности записывались в виде растра 512×512 точек и градацией яркости $0 \div 255$. Экспериментально построенные зависимости "шероховатости" профиля поверхности $\ln(L/L_0)$ от числа масштабных отрезков N представляют собой зависимости обратнотангентного вида (так называемый фрактальный график), где L — длина ломаной профиля, L_0 — длина ее проекции. Методом наименьших квадратов определялся наклон линейного участка $|\alpha|$ фрактального графика, построенного для каждой строки изображения. Фрактальная размерность вычислялась из соотношения $D = 1 + |\alpha|$, путем усреднения по всем строкам. Для анализа рельефа деформируемой поверхности применялось два способа вычисления фрактальной размерности: измерение фрактальной размерности структуры в целом (D_f) и измерение фрактальной размерности на разных масштабных уровнях (D_m). В этом случае измерения проводили при двух увеличениях растрового электронного микроскопа $\times 250$ и $\times 5000$, что соответствовало размеру кадра сканируемой поверхности $400 \times 400 \mu\text{m}$ и $20 \times 20 \mu\text{m}$ соответственно. В первом случае при последовательном смещении растра получали изображение всей поверхности образца, а во втором — изображение получалось в середине участка кадра $400 \times 400 \mu\text{m}$.

Металлографические исследования показали, что после появления остаточной пластической деформации на поверхности материала возникает деформационный рельеф в виде полос локализованной деформации. Они ориентированы в двух направлениях и расположены под углом 45° к оси нагружения.

Основной вклад в пластичность композиционного материала дает связующая фаза, поэтому анализ изменения внутренней структуры в процессе деформации проводился только для связки и предполагалось, что карбид вольфрама не деформируется. Это допущение оправданно, так как заметных изменений в ширинах рентгеновских дифракционных максимумов, принадлежащих карбиду вольфрама, не наблюдалось.

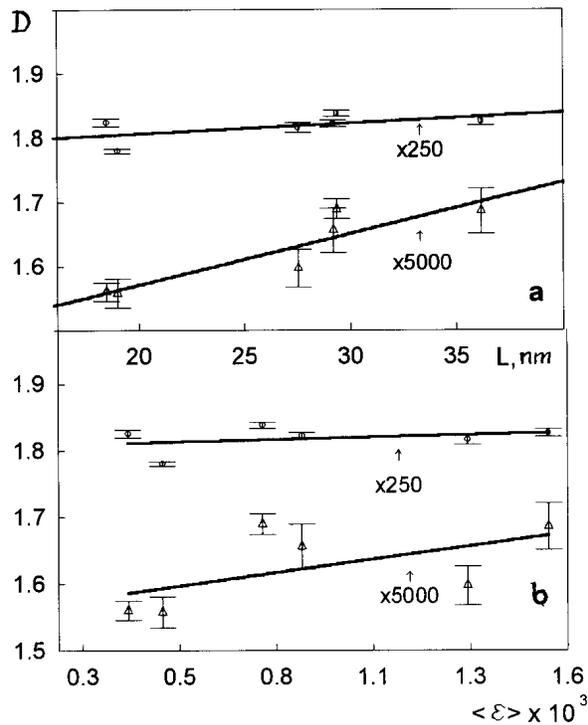


Рис. 1. Изменения значений фрактальной размерности D в зависимости от областей когерентного рассеяния (*a*) и микронапряжений (*b*), измеренные на разных масштабных уровнях, в процессе деформации твердого сплава.

По отражениям (111) и (222) связующей фазы определены области когерентного рассеяния (ОКР) и микронапряжения (ε). При этом наибольшая точность описания профилей рентгеновских линий получена при их аппроксимации функцией Коши. Измерения областей когерентного рассеяния и микронапряжений в процессе деформации твердого сплава показали, что с ростом остаточной деформации происходит уменьшение ОКР, что связано с формированием мелкокристаллической структуры в связующей фазе композита, а микронапряжения в процессе пластической деформации снижаются.

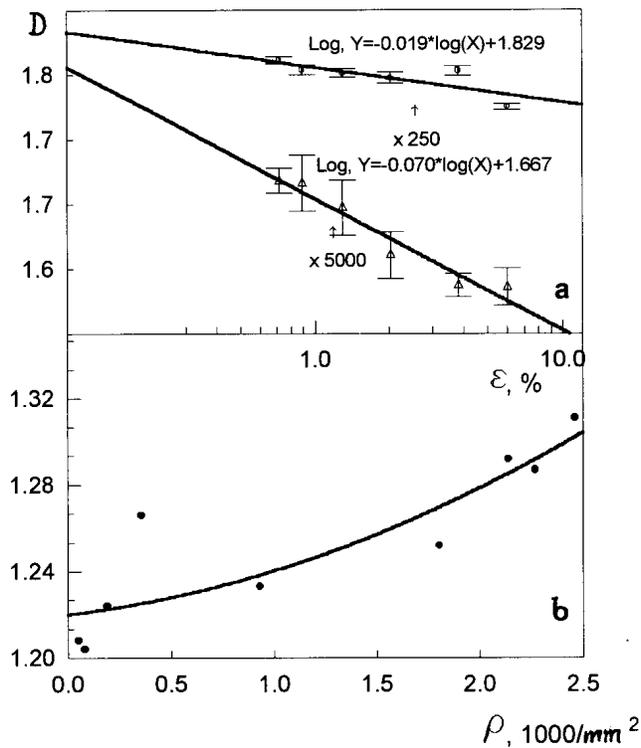


Рис. 2. Изменение значений фрактальных размерностей D_m в зависимости от остаточной деформации (a), и изменение фрактальной размерности D_f в зависимости от плотности полос локализованной деформации (b).

На рис. 1 представлены зависимости изменения фрактальной размерности при изменении областей когерентного рассеяния и микронапряжений. Увеличение размеров ОКР приводит к увеличению значений фрактальной размерности. Следует отметить, что изменения фрактальной размерности на масштабном уровне, соответствующем размеру раstra $20 \times 20 \mu\text{m}$ значительно сильнее, чем при малом увеличении. Кроме того, при экстраполяции значений на большой размер ОКР и большие микронапряжения зависимости пересекаются, т.е. в исходном

состоянии (без остаточной деформации), фрактальные размерности на разных структурных уровнях равны.

На рис. 2, *a* показаны зависимости значений фрактальных размерностей D_m от остаточной деформации. Видно, что значения D_m уменьшаются на обоих масштабных уровнях, при этом зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией. Более сильное изменение значений фрактальной размерности наблюдается на более низком масштабном уровне, при размере растра $20 \times 20 \mu\text{m}$. При экстраполяции линейных зависимостей на недеформированное состояние они пересекаются, что говорит о том, что в недеформированном материале значения фрактальной размерности D_m одинаковы на разных структурных уровнях.

Измерение фрактальной размерности структуры в целом (D_f) показало, что она увеличивается при увеличении степени деформации наряду с увеличением плотности полос локализованной деформации (ρ) (рис. 2, *b*), причем ее изменение с ростом остаточной деформации больше, чем изменение плотности полос локализации, а наименьшее отклонение от экспериментальных значений дает квадратичный полином.

Таким образом, проведенные исследования показали, что имеется однозначная корреляция между возникающим на поверхности рельефом и его фрактальной размерностью. Фрактальные характеристики рельефа связаны с микроструктурными параметрами, имеют линейную функциональную зависимость от микроструктурных параметров связующей фазы — областей когерентного рассеяния и микронапряжений, разную на разных масштабных уровнях.

Список литературы

- [1] Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 1. С. 7–34.
- [2] Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. С.: Мир, 1991. 260 с.
- [3] Королев П.В., Кульков С.Н. // Перспективные материалы. 1997. № 3. С. 21–27.
- [4] Севостьянова И.Н., Гнюсова С.Ф., Кульков С.Н. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1996. № 2. С. 21–24.