УДК 534.8

В.В. Поляков, С.В. Кучерявский Фрактальный анализ границ раздела в пористых псевдосплавах

Прочностные свойства и деформационное поведение многокомпонентных материалов существенным образом зависят от особенностей их строения. Новым и своеобразным классом многокомпонентных материалов являются пористые псевдосплавы, которые можно рассматривать как предельный случай гетерогенной среды с максимально различающимися свойствами компонентов - порового пространства и металлических компонентов, образующих твердый каркас. Структура таких материалов представляет собой достаточно сложный геометрический объект, и традиционные методы изучения, основанные на аппроксимации исследуемой структуры геометрическими фигурами, не позволяют описать особенности топологии тонкой структуры таких объектов, ее образование и эволюцию. В связи с этим для описания внутреннего строения таких материалов актуальным является привлечение методов фрактальной геометрии, которая дает чрезвычайно компактный способ количественного описания сложных объектов и процессов [1, 2]. Такой подход наиболее эффективен при использовании компьютерного анализа структуры, проводимого путем непосредственной обработки изображений и позволяющего существенно повысить точность и надежность результатов, расширить круг изучаемых характеристик структуры.

В настоящей работе проведен фрактальный анализ границ порового пространства при пластической деформации и разрушении псевдосплавов с разной пористостью.

В качестве объектов исследования были использованы пористые псевдосплавы Fe-Cu. Образцы изготовлялись путем смешивания металлических порошков железа (со средним размером частиц 80 мкм, чистотой не менее 99,5% Fe) и меди (средний размер частиц 25 мкм, чистота не менее 99,5% Си), одноосного прессования до заданной пористости и последующего спекания в вакууме в течение 4-х часов. Условия спекания были выбраны такими, чтобы обеспечить образование металлической связи в твердой фазе (до начала плавления меди). Изготовленные образцы имели вид цилиндров диаметром 15 мм и высотой 10-15 мм. Пористость Р образцов задавалась в интервале от 10 до 40%, при этом основной вклад в нее давали сообщающиеся межзеренные поры, образовывавшие «бесконечный» поровый кластер. Концентрация меди С изменялась от 10 до

30%, так что структуры псевдосплава характеризовались бесконечными и взаимопроникающими каркасами металлических компонентов.

Микроструктура материала анализировалась с помощью оптической и растровой электронной микроскопии. Изображения микрошлифов с боковой поверхности образца подавались непосредственно в компьютер, осуществлявший обработку изображений по специально разработанной программе.

Для исследования влияния деформации на микроструктуру образцы подвергались одноосному сжатию. Выбранная схема нагружения позволила получить достаточно широкий интервал деформаций по сравнению с растяжением и тем самым надежно изучить процесс разрушения на стадии образования, развития и слияния микротрещин. Деформация е изменялась в диапазоне от $\boldsymbol{\mathcal{E}} = 0$ до значений, соответствовавших появлению системы магистральных трещин. Эти значения составляли 15-20% при малой пористости, 10-15% для высокопористых образцов.

В работе находилась фрактальная размерность границ порового пространства на плоскости шифа. Эта величина определялась путем обработки микрофотографий следующим образом. В начале по изображению поверхности с помощью алгоритма «canny edge detection» [3] отыскивали границы раздела, затем для этих границ рассчитывали соотношения между суммарной длиной периметра N всех пор и линейным размером d ячеек измерительной сетки покрывающих границ. Эти соотношения представлялись в виде

$$\mathbf{N} = \operatorname{const} \, \delta^{-D} \,, \tag{1}$$

что позволяло рассчитать D как тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей соотношение (1) в двойном логарифмическом масштабе:

$$D \log N(\delta) \sim \log(\delta)$$
. (2)

Изменение структуры нагружаемого образца анализировали на каждом этапе пластической деформации с шагом по е на несколько процентов. При росте е наблюдается усложнение строения порового пространства. На начальных стадиях пластической деформации это связано с включением различных физических механизмов, ответственных за пластическое течение. К ним относятся искривление границ раздела за счет внутризеренных дислокационных процессов, особенно существующих при малых значениях *P*; ротационные эффекты поворота зерен и конгломератов зерен как целого, обнаруженные и описанные в работах [4, с. 269–273; 5, с. 100–105]; явления «выдавливания» в поры зерен и их фрагментов при высокой пористости, когда зерна и поры становятся изомерными. При росте деформации возникают микротрещины, инициируемые межзеренными порами и развивающиеся преимущественно по границам между зернами и фазами. Дальнейшее увеличение е приводит к слиянию микротрещин, фрагментации материала и его разрушению за счет образования магистральных трещин.

Количественное описание выявленных измерений микроструктуры проводилось путем расчета фрактальных размерностей границ порового пространства на различных этапах нагружения. Типичные зависимости фрактальной размерности от деформации приведены на рисунке.

Öðàêòàëüí àÿ ðàçì aðí î ñòü, D



Зависимости фрактальной размерности границ порового пространства от степени деформации при разных значениях пористости, Р (П - 34%; П - 32%; П - 24%)

Как видно из рисунка, для всех исследуемых материалов величина *D* превосходит топологическую размерность границ раздела, равную единице. Это означает, что поверхность порового пространства имеет фрактальный характер. Рассчитанные точки, относящиеся к большим значениям *P*, расположены выше, что означает рост фрактальной размерности при увеличении пористости. Это отражает усложнение структуры порового пространства для высокопористого материала за счет увеличения числа и размеров межзеренных и межфазных пор, а также изменение их морфологии при развитии бесконечного порового кластера.

Из рисунке следует, что увеличение деформации вызывает изменение фрактальной размерности границ порового пространства. На зависимостях *D*(**ε**) можно выделить несколько участков, соответствующих различным стадиям пластической деформации, предразрушения и разрушения. При малых значениях ϵ величина D растет по сравнению с ненагруженным материалом за счет усложнения структуры порового пространства. При є~10% отмечается немонотонное увеличение D, связанное с образованием микротрещин. Уменьшение D на заключительном этапе деформации связано с переходом от системы микротрещин к крупным магистральным трещинам, что упрощает структуру бесконечного порового кластера.

В работе установлен фрактальный характер границ порового пространства псевдосплавов. При этом величина *D* существенно зависит от пористости. Обнаружены зависимость фрактальной размерности границ раздела от степени деформации при нагружении материалов и корреляция между *D* и стадиями разрушения. Полученные результаты показывают, что фрактальная геометрия является эффективным методом количественного анализа деформационного поведения многокомпонентных материалов с резко неоднородным строением.

Литература

1. Иванова В.С. Фракталы и синергетика в материаловедении. М., 1994.

2. Benuit B. Mandelbrot. The fractal geometry of nature. San Francisco, 1983.

3. J.Canny; A computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Int. 1986. Vol. PAMI-8. №6. Nov. 4. Polyakov V.V., Syrov G.V., Fadeev A.V. Mechanisms of plastic deformation of porous metals, Proc / / Conf. deformation and fracture in structural pm materials. 1996. Vol. 1.

5. Панин В.Е., Поляков В.В., Сыров Г.В., Фадеев А.В. Эволюция механизмов пластической деформации в пористых металлах // Известия вузов. Томск, 1996.