

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 максимальным 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 изготавливались 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%  $Cu$ ), 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  $P$  образцов задавалась в интервале от 10 до 40%, при этом основной вклад в нее давали сообщающиеся межзеренные поры, образовавшие «бесконечный» поровый кластер. Концентрация меди  $C$  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  $\epsilon$  изменялась в диапазоне от  $\epsilon = 0$  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 шлифа. 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

$$N = \text{const } \delta^{-D}, \quad (1)$$

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

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

Изменение структуры нагружаемого образца анализировали на каждом этапе пластической деформации с шагом по  $\epsilon$  на несколько процентов. При росте  $\epsilon$  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 внутриверенных дислокационных процессов, особенно существующих при малых значениях  $P$ ; ротацион-

