

05

Фрактальные структуры в металлических материалах после ионного облучения и лазерного воздействия

© В.С. Хмелевская, Н.В. Куликова, В.В. Бондаренко

Обнинский государственный технический университет
атомной энергетики

В окончательной редакции 18 марта 2005 г.

Рассматриваются состояния в металлических материалах, подвергнутых ионному облучению, а также облучению лазером. При высоких уровнях радиационного повреждения структурные элементы на поверхности этих материалов оказываются пространственно самоорганизованными. Показано, что эти структурные элементы могут быть идентифицированы как фрактальные структуры, причем фрактальная размерность этих структур изменяется в зависимости от параметров внешнего воздействия, а также в зависимости от внутренних характеристик структур.

При радиационном воздействии на металлические материалы — чистые металлы и твердые растворы — было обнаружено, что в некоторой области радиационных параметров (доз, температур мишени и интенсивностей ионного потока или мощности лазерного воздействия) в приповерхностных слоях материалов развивается неустойчивость и формируются структуры с признаками пространственной самоорганизации [1–3]. Известно, что такие структуры характерны для открытых систем в нелинейной области при закритической степени воздействия [4,5], т.е. в данном случае при некотором достаточно высоком уровне радиационного повреждения. Ранее радиационно-индуцированные состояния после ионного облучения были детально исследованы для 40 различных металлических материалов [2,6]. Было показано, что они являются неравновесными, поскольку связанные с ними изменения структуры и свойств исчезают в процессе пострadiационного отжига при температурах, не превышающих температуру мишени в процессе облучения.

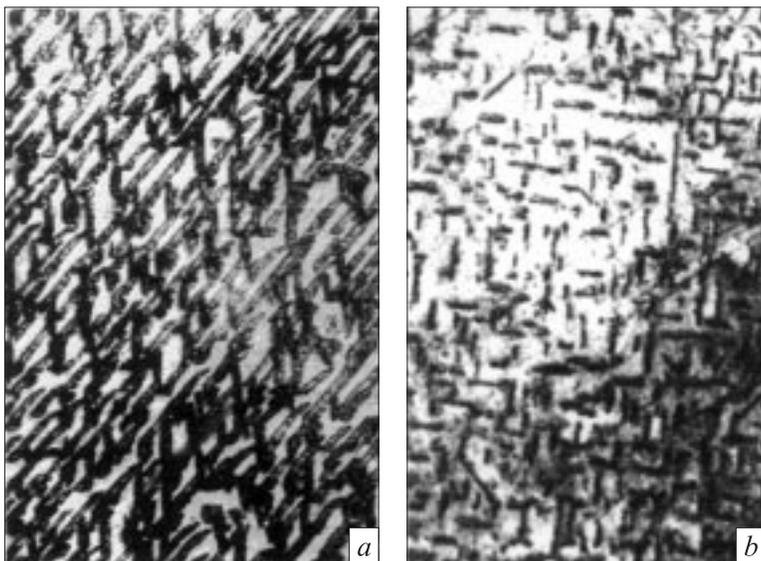


Рис. 1. Пространственно самоорганизованные структуры в поликристаллическом сплаве системы Fe–Cr, облученном ионами Ag^+ , 30 keV, температура мишени $500^\circ C$, для двух различных зерен (*a, b*).

Примеры таких самоорганизованных структур показаны на рис. 1–3. Структуры на рис. 1, *a* и *b* получены методом оптической металлографии на поверхности сплава Fe–18Cr после облучения его в ионном ускорителе „Vita“ ионами Ag^+ с энергией 30 keV до дозы $1.5 \cdot 10^{18}$ ions/cm² при температуре $500^\circ C$. Рис. 1, *a* и *b* соответствуют двум различным зернам поликристаллического материала и, следовательно, имеют различную кристаллографическую ориентировку.

На рис. 2, *a* и *b* показаны два различных зерна поликристаллического сплава V–4Cr–4Ti после облучения ионами Ag^+ с энергией 30 keV до дозы $1.5 \cdot 10^{18}$ ions/cm² при температуре мишени $700^\circ C$. На рис. 3 представлена поверхность образца сплава Fe–18Cr–10Ni–Ti (ГЦК кристаллическая решетка) после облучения твердотельным импульсным лазером ЛТИ-406, YAG:Ng с длиной волны $1.06 \mu m$ и длительностью импульса 10–20 ns.

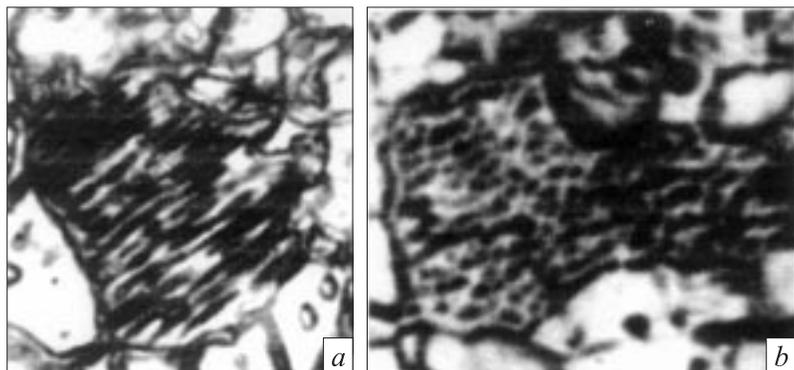


Рис. 2. Пространственно самоорганизованные структуры в облученном ионами Ag^+ (30 keV, 700°C) в поликристаллическом сплаве V–4Ti–4Cr для двух различных зерен.

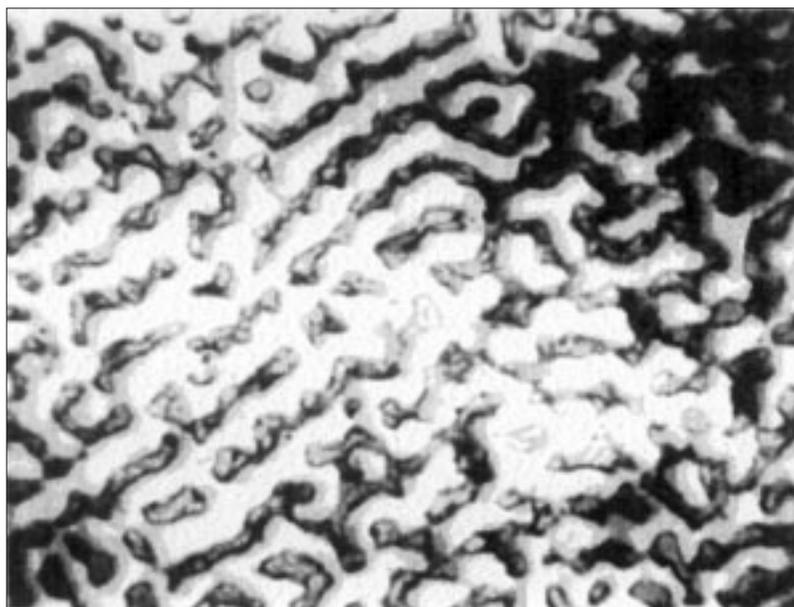


Рис. 3. Пространственно самоорганизованная структура в сплаве Fe–18Cr–10Ni–Ti после лазерного воздействия (150 импульсов).

Структуры, представленные на рис. 1–3, обладают свойствами самоподобия на различных масштабных уровнях и могут быть идентифицированы как фракталы [7]. В работе сделана попытка применения методов фрактального анализа [7,8] для количественного описания процессов самоорганизации и оценки взаимосвязи между количественными характеристиками фрактальной структуры и параметрами внешнего воздействия.

Известно, что метод фрактального анализа в течение ряда лет используется в материаловедении (см., например, [9,10]), однако в этих работах объектом исследования были зеренная структура или пористые материалы. В данной работе рассматриваются пространственно самоорганизованные структуры после ионного облучения, впервые полученные авторами, а также структуры после лазерного облучения, в которых гетерофазная структура формируется в результате радиационного воздействия.

Для целей компьютерного моделирования были получены цифровые отображения фотографий рис. 1 и 2. Они были приняты как реализация пространственного стохастического процесса, определенного на некоторой области размерности 2 [7,9,11]. При анализе фотографий используется непрерывное прямоугольное ограничение, в котором наиболее наглядно представлен процесс самоорганизации. При наличии у изучаемого объекта свойства самоподобия его можно количественно характеризовать величиной фрактальной размерности [7–9,11]. В ходе компьютерного анализа цифровое изображение структуры рассматривается в виде последовательности матриц, получаемых разбиением фотографии квадратными сетками, состоящими из одинаковых по размеру ячеек, размер которых последовательно уменьшается [7,8]. Дискретизация осуществляется присвоением ячейке значения 1, если в покрываемом ячейкой блоке изображения присутствует темное пятно, или 0 в противном случае [12]. Размер блока покрытия элемента изображения первой аппроксимирующей матрицы выбирается сопоставимым по размеру с элементом наблюдаемой структуры.

Результаты анализа показывают, что выбранная количественная характеристика самоорганизованной структуры и параметры внешнего воздействия коррелируют между собой. На рис. 4 показана зависимость фрактальной размерности в сплаве Fe–Cr после лазерного облучения в зависимости от числа импульсов. Размерность монотонно уменьшается, значения при 150 и 300 импульсах отличаются на 9%. На рис. 1 и 2

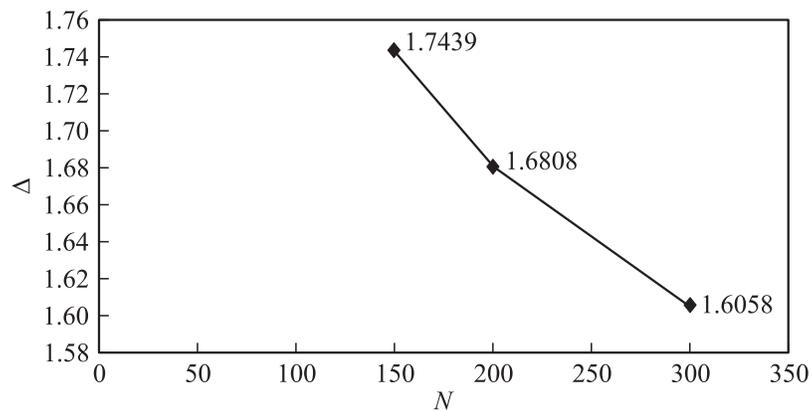


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности самоорганизованных структур в сплаве Fe–18Cr–10Ni–Ti от количества импульсов при лазерном облучении.

показаны цифровые изображения фрактальных структур, полученных для поликристаллических образцов двух сплавов — Fe–Cr и V–Ti–Cr. В каждом случае рассматриваются структуры в различных зернах поликристалла. Очевидно, что кристаллографические ориентировки в них различны, однако конкретная ориентировка неизвестна (в таблице они обозначены как первая или вторая кристаллографическая ориентировка). Общий вид самоорганизованных структур для различных зерен в обоих материалах отличается, при этом отличается также их фрактальная размерность (см. таблицу).

Фрактальная размерность в различных зернах облученных поликристаллов

Материал	Тип кристаллической решетки	Температура мишени, °C	Кристаллографическая ориентировка	Фрактальная размерность
Fe–12Cr–Mo–W–V–Nb	ОЦК	500	Первая	1.7754
Fe–12Cr–Mo–W–V–Nb	ОЦК	500	Вторая	1.849
V–4Cr–Ti	ОЦК	700	Первая	1.7292
V–4Cr–Ti	ОЦК	700	Вторая	1.8017

Таким образом, можно констатировать, что фрактальная размерность как количественная характеристика оказывается чувствительной как к параметрам внешнего воздействия, так и к внутренним характеристикам материала. Проблема, несомненно, требует дальнейшего исследования, однако очевидно, что фрактальный анализ может быть полезен при изучении сильнонеравновесных состояний вещества.

Список литературы

- [1] *Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G.* // Phase Transitions. 1997. V. 60. P. 59–65.
- [2] *Хмелевская В.С., Малынкин В.Г.* // Материаловедение. 1998. № 2. С. 25–33.
- [3] *Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Базалеев Е.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 23. С. 21–25.
- [4] *Николис Г, Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [5] *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980. 412 с.
- [6] *Khmelevskaya V.S., Solovyev S.P., Malynkin V.G.* // J. Nucl. Mater. 1993. V. 199. P. 214–220.
- [7] *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry nature. N.Y.: Freeman, 1983. 480 p.
- [8] *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 257 с.
- [9] *Иванова В.М., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [10] *Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Масляев С.А., Пименов В.Н.* // Перспективные материалы. 1999. № 4. С. 5–13.
- [11] *Попова И.А., Саврасова Н.А., Домашевская Э.П.* // Конденсированные среды и межфазовые границы. 2000. Т. 2. № 4. С. 295–298.
- [12] *Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж.* Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск: Научно-издательский центр „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001. 116 с.