

ДИНАМИКА МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ФОЛЫГ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА $Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ

Обидов Б.А., Корсуков В.Е., Анкудинов А.В., Бетехтин В.И., Бутенко П.Н.,
Гиляров В.Л., Корсукова М.М., Нарыкова М.В.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия
Vjacheslav.Korsukov@mail.ioffe.ru

Роль поверхности в зарождении деформационных дефектов, развитии деформации и разрушения металлических стекол (МС) является предметом многочисленных исследований [1–5]. Известные из литературы экспериментальные и теоретические данные о поведении поверхностных слоев в процессе деформации и разрушения этих материалов являются часто противоречивыми и носят дискуссионный характер. В связи с этим, исследования трансформации рельефа поверхности в поле механических сил является актуальной задачей.

Цель работы: изучение морфологии и статистических характеристик поверхности лент МС в процессе растяжения и установление признаков предстоящего разрыва.

Объекты и методы исследования: ленты МС $Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$ (промышленная марка 2НСР), полученные методом спиннингования. Применялась сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), оптическая микроскопия (ОМ) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Исследовалась контактная (по отношению к диску) поверхность ленты; одноосное растягивающее напряжение прикладывалось в диапазоне 0 – 2.7 GPa. В результате определялись мультифрактальные характеристики поверхности с помощью метода фрактального поверхностного анализа (методика «Box Counting») [6] и метода мультифрактального формализма [7, 8].

Результаты. Под действием растягивающей нагрузки проявляются следующие эффекты на поверхности образцов: (рис. 1) появление линейных дефектов, перпендикулярных оси действия нагрузки и линейных дефектов под углом 45° к оси действия нагрузки, кроме того происходит частичное заглаживание рельефа, проявляются полосы сброса, поверхностные трещины. Эти эффекты наблюдались и в более ранних работах [1, 2].

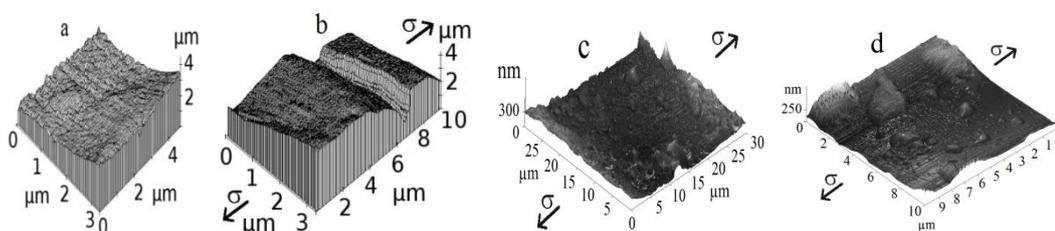


Рисунок 1 - Изображения поверхности МС $Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$: а – без нагрузки, б – $\sigma = 2.3$ GPa (метод СТМ), с – $\sigma = 0.2$ GPa, d – $\sigma = 2.5$ GPa (метод АСМ)

По данным СТМ были рассчитаны значения фрактальной размерности (D_f) и по зависимостям $f(\alpha) \sim \alpha$ ширины спектра сингулярностей (Γ) в зависимости от приложенного напряжения (рис.2). Видно, что фрактальная размерность перед разрывом образца растет, а значения ширины спектра сингулярностей ведут себя неоднозначно. В одной области образца эти значения перед разрывом образца уменьшается (случай 2), а в другой - увеличиваются (случай 1).

Анализ предыдущих работ показал, что по изменению фрактальной размерности поверхности в образцах при их растяжении нельзя однозначно судить о

предстоящем разрыве [1]. Если система мультифрактальна, то D_f , измеренная на площадке малого размера поверхности, может сильно отличаться от D_f , измеренной от той же поверхности, но на площадке большого размера [1]. В работе было зафиксировано

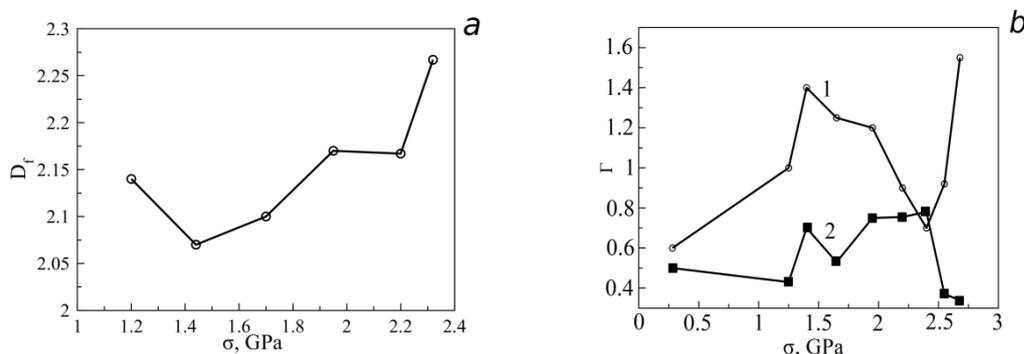


Рисунок 2- Рассчитанные по данным СТМ зависимости фрактальной размерности (а) и ширины спектра сингулярностей (b) от величины внешнего напряжения.

различие в поведении коэффициента Гельдера H и ширины спектра сингулярностей Γ в предразрывном состоянии для разных областей поверхности образца. Тем не менее, опираясь на возможное негативное влияние на результаты расчетов, связанное с недостаточной статистикой в работе [1], в настоящей работе мы расширили область сканирования до 512 x 512 точек (вместо 200 x 200).

Также нами были рассчитаны зависимости $f(\alpha) \sim \alpha$ при различных напряжениях (рис. 3), приложенных к образцу по данным АСМ. Здесь применен алгоритм расчета спектров сингулярностей в двумерном случае [8]. Ниже мы будем сравнивать результаты, полученные методами СТМ и АСМ (одномерный и двумерный случаи); для этого необходимо иметь схожие размеры площадок. Выбирали площадки размерами 10 x 10 μm .

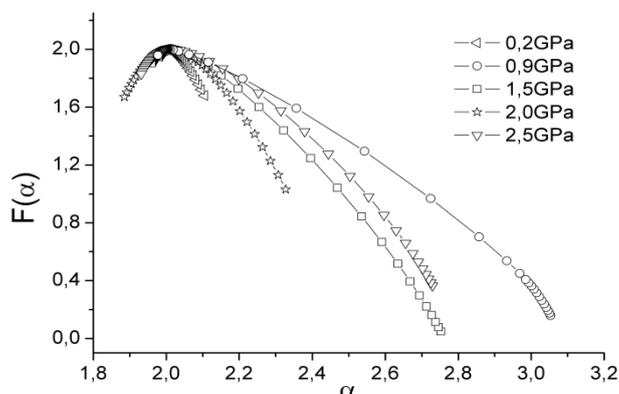


Рисунок 3 - Рассчитанные из АСМ-топограмм спектры сингулярностей для площадок 100 μm^2 при различных напряжениях

Из рис. 3 видно, что рельеф поверхностей сильно зависит от нагрузки, как и в случае метода СТМ. Кроме того, значения функции $f(\alpha_{min}) > f(\alpha_{max})$ для всех кривых. Согласно [8] это означает, что на поверхности число возвышенностей преобладает над числом впадин и степень мультифрактальности высокая. Также отмеченное неравенство может быть связано с аппаратными особенностями эксперимента, например, игла зондового микроскопа может легко подняться над поверхностью, но проникнуть в глубокую крутую впадину ей значительно сложнее.

На рис. 4(а) показана зависимость фрактальной размерности от напряжения, полученная из АСМ-топограмм и находится в хорошей корреляции с кривой, полученными из СТМ топограмм. Однако, нас больше интересует зависимость ширины спектра сингулярностей поверхности от внешнего напряжения (рис.4b), т. к. она получена при относительно большой статистике и здесь реализован двумерный случай расчета. Данный график показывает стремление поверхности к монофрактализации,

что может служить признаком предстоящего разрыва образца. Таким образом, при увеличении внешней нагрузки перед разрывом образца ширина спектра сингулярностей уменьшается.

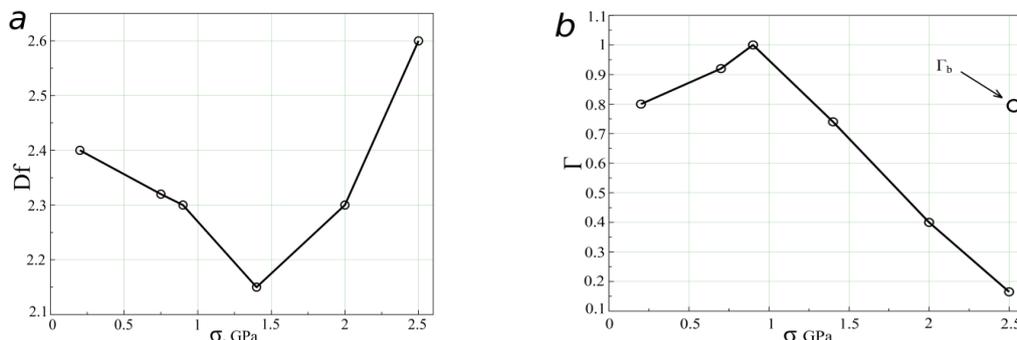


Рисунок 4 - Рассчитанные из АСМ-топограмм - зависимости фрактальной размерности (а) и значения ширины спектра сингулярностей (b) при различных напряжениях

С помощью методов ОМ и СЭМ мы получили изображения исследуемой поверхности именно в той области, где Γ меняется на уменьшение (изображения не приводятся). Действительно, в этой области начинает формироваться трещина, а перед ее вершиной происходит частичное разглаживание поверхности, таким образом, система может переходить в монофрактальное состояние.

Для подтверждения данной гипотезы мы сняли топограммы АСМ у разорванного образца вблизи к поверхности разрыва для площадок $10 \times 10 \mu\text{m}$. Оказалось, что величина ширины спектра сингулярностей для разорванного образца составляет $\Gamma_b = 0.8$, что фактически совпадает с величиной Γ для исходной поверхности, (см. рис. 4b) при том, что в этом случае напряжение фактически равно нулю. Это означает, что гипотеза о вкладе вершины магистральной трещины в поведении ширины спектров сингулярностей, достаточно весома.

Выводы. Топологические и статистические характеристики геометрии поверхности образцов, подвергнутых одноосному растяжению, изменяются немонотонно. С приближением разрушения, наблюдается тенденция перехода поверхности от мультифрактального к монофрактальному состоянию, которое в ряде случаев осложняется влиянием вершины магистральной трещины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00360.

Литература.

1. V. L. Hilarov, V. E. Korsukov, P. N. Butenko, V. N. Svetlov. Physics of the Solid State, Vol. 46, No. 10, 1868 (2004).
2. V. Korsukov, P. Butenko, A. Chmel. EPL 90, 26007 (2010).
3. W. Guo, Y. Meng, X. Zhang, V. Bedekar, H. Bei, et al. Acta Materialia 152, 107 (2018).
4. L. Zhang, M.Q. Tang, Z.W. Zhu, H.M. Fu, H.W. Zhang, A.M. Wang, H. Li, H.F. Zhang, Z.Q. Hu. Journal of Alloys and Compounds 638, 349 (2015).
5. G. E. Abrosimova, A. S. Aronin. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques Vol. 12, No. 3, 492 (2018).
6. N. Sarkar, B. Chaudhuri. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 24, 115 (1994).
7. R.P. Yadava, S. Dwivedi, A.K. Mittal, M. Kumarc, A.C. Pandey. Appl. Surf. Sci. 261, 547 (2012).
8. M. Nasehnejad, M. Cholipour Shahraki, G. Nabiyouni. Appl. Surf. Sci. 389, 735 (2016).