

05;11;12

Влияние одноосного растяжения на геометрические параметры рельефа поверхности аморфного сплава $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$

© В.И. Бетехтин, П.Н. Бутенко, В.Л. Гиляров, В.Е. Корсуков,
А.С. Лукьяненко, Б.А. Обидов, В.Е. Харциев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: Vjacheslav.Korsukov@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 16 августа 2001 г.

Методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) изучено влияние одноосного растяжения в широком интервале нагрузок (0–3 ГПа) на топографию поверхности аморфного сплава $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$. Обнаружено изменение распределений дефектов по вертикальным и латеральным размерам, в частности увеличение количества крупномасштабных дефектов, а также увеличение фрактальной размерности поверхности при росте нагрузки. Высказано предположение о диффузионном механизме формирования рельефа, а также о роли наблюдаемых эффектов в зарождении очага разрушения на поверхности.

В последнее время интенсивно развиваются исследования структуры поверхности твердых тел [1], в том числе аморфных металлов на микро- и наноуровнях и ее изменений при механическом воздействии, что важно для понимания физических свойств этих перспективных материалов [2]. Впервые метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для исследования боковой поверхности одноосно растянутой фольги аморфного сплава применен нами в работе [3].

В данной работе ставится задача ступенчатого повышения нагрузки вплоть до разрыва образца и одновременного систематического изучения трансформации геометрических параметров рельефа боковой поверхности.

Поскольку в настоящее время еще не сформулирована общепринятая систематика дефектов структуры аморфных материалов, для описания трансформации рельефа поверхности нами разработан "спектроскопический" подход к описанию его геометрических параметров. В этом

подходе "спектральное" состояние рельефа задается распределением высот и полуширин возвышений-бугров в двух направлениях, подобно аналогичным параметрам пиков интенсивности, скажем, в оптическом спектре для анизотропного кристалла. При этом особенности рельефа обратного знака — углубления также описываются соответствующими параметрами — глубиной и полушириной.

Таким образом, целью данной работы является изучение спектрального и фрактального состояния поверхности аморфных металлических фольг в зависимости от уровня механической нагрузки.

Основным методом анализа служил метод СТМ, в качестве дополнительного для контроля химического состава поверхности использовался метод электронной Оже-спектроскопии.

Образцами служили фольги из аморфного сплава $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$, полученные методом спиннингования из расплава на воздухе и в вакууме. Качественных отличий в поведении фольг различного происхождения не обнаружено. Далее речь будет идти о результатах для фольг, полученных на воздухе.

Образцы вырезались в виде узких полосок длиной 20 мм, шириной 8 мм и толщиной 20 мкм, концы которых закреплялись в специальном нагружающем устройстве, обеспечивающем постоянное одноосное растягивающее напряжение. Нагрузка менялась ступенчатым образом в пределах $\sigma = 0-3$ ГПа. Для локализации места разрушения в средней части образца с краев вырезались полукруглые отверстия диаметром 3 мм, так что несущая нагрузку часть образца имела ширину 2 мм. При такой геометрии образца максимум продольной нагрузки в эпоэре напряжений локализован на пересечении продольной оси образца и линии, соединяющей центры полукруглых отверстий. Игла-зонд микроскопа подводилась как раз к этой точке исследуемой боковой поверхности, в качестве которой выбрана внешняя сторона фольги, не контактирующая с холодной подложкой при ее формировании. Эта поверхность не подвергалась какой-либо предварительной обработке, она только промывалась в спирте, а затем в дистиллированной воде и сушилась. Эксперименты проводили в атмосфере сухого азота. СТМ-топограммы снимались при комнатной температуре. Результаты получали в цифровом виде и в дальнейшем обрабатывали с помощью компьютера. Спектральный и фрактальный анализ топограмм осуществлялся с помощью разработанных нами компьютерных программ.

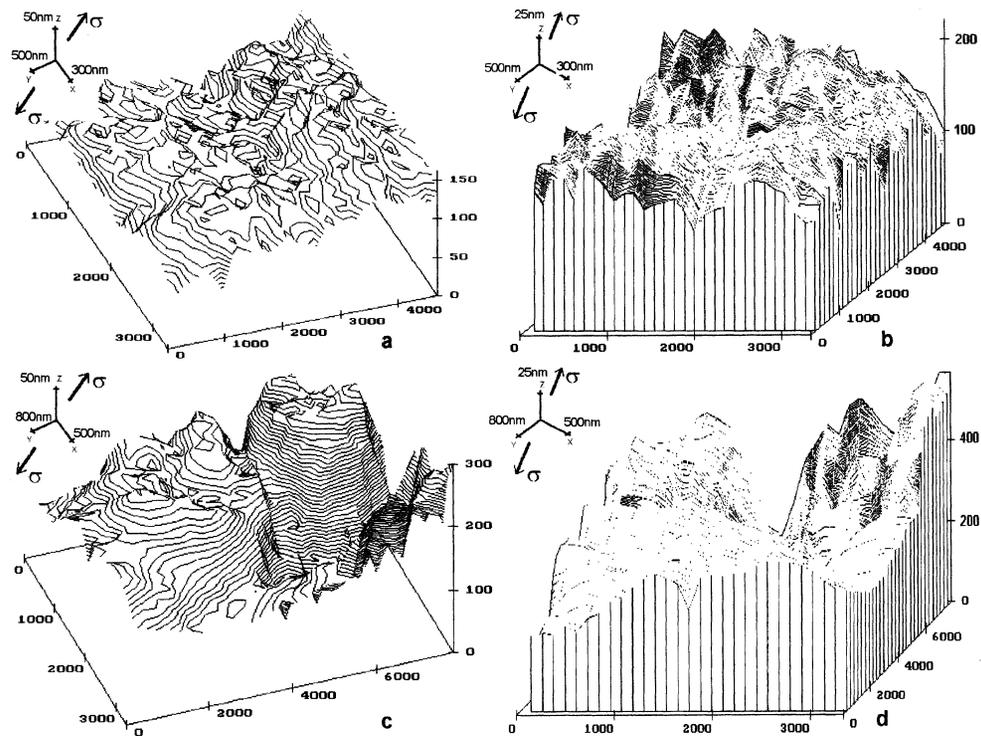


Рис. 1. Рельеф поверхности образца при разных нагрузках, масштабах и углах зрения: *a, b* — $\sigma = 0.1$ GPa, *c, d* — $\sigma = 1.35$ GPa.

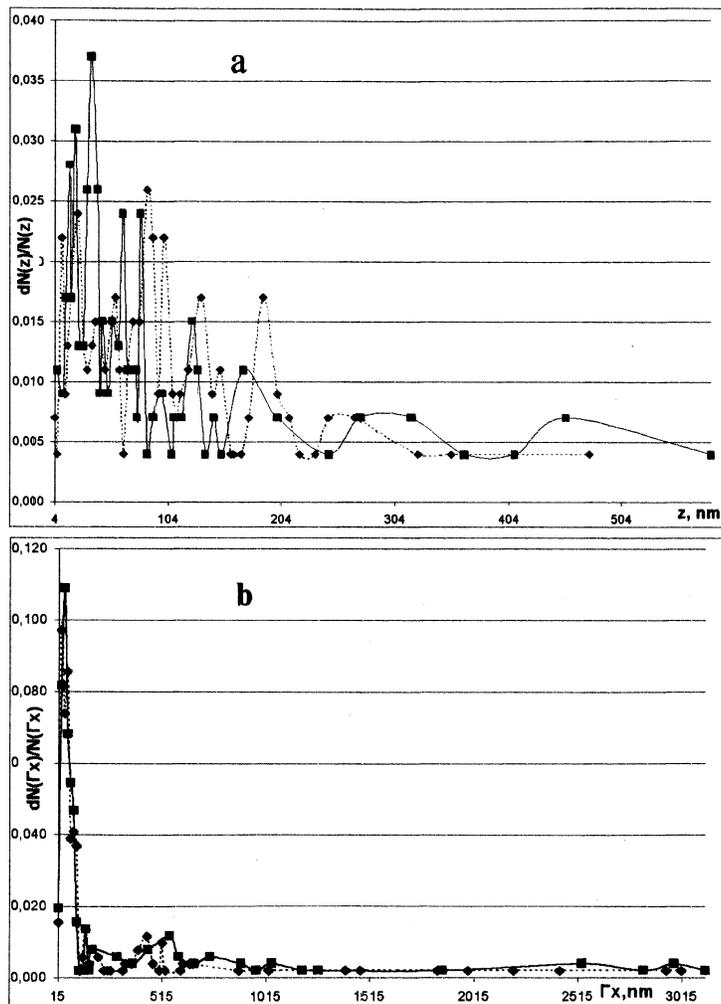


Рис. 2. Спектральные и фрактальные характеристики рельефа поверхности в зависимости от внешнего напряжения: *a* – распределение по высотам бугров, *b* – распределение по полуширинам бугров в направлении *OX*, *c* – распределение полуширин в направлении *OY* (сплошная линия – $\sigma = 0.1$ GPa; пунктирная – $\sigma = 1.35$ GPa), *d* – зависимость фрактального размера от внешнего напряжения.

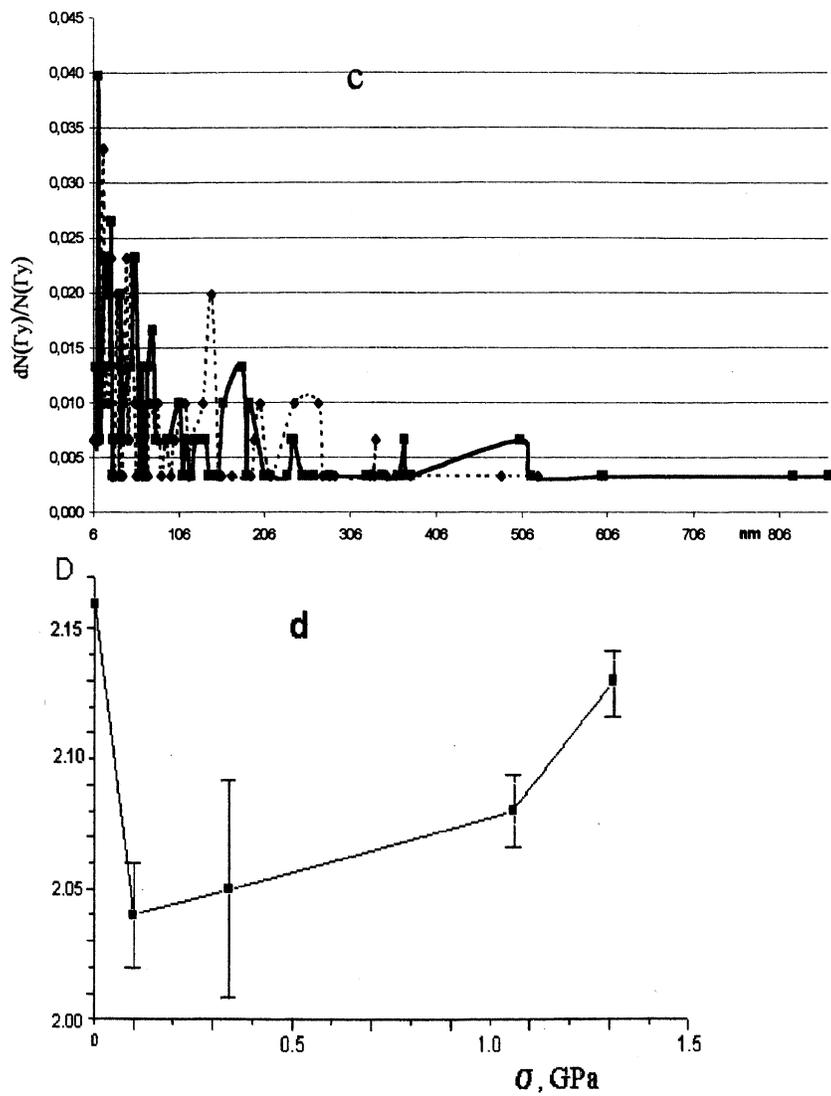


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 1 показаны топограммы одного и того же участка поверхности при малой и большой нагрузках. Их качественное различие бросается в глаза, однако, кроме утверждения о появлении крупномасштабных дефектов, ничего более определенного на таком уровне рассмотрения сказать нельзя.

Более определенные утверждения можно сделать после количественного спектрального анализа рельефа поверхности на каждом проходе иглы-зонда и статистической обработки полученных данных. Результаты этого анализа представлены на рис. 2, *a, b, c* в виде распределений по вертикальным и латеральным размерам дефектов-бугров для ненагруженного образца и образца под нагрузкой. Аналогичные распределения построены и для дефектов-углублений. Анализ распределений на рис. 2, *a, b, c* позволяет сделать более развернутые заключения о характере изменений рельефа поверхности под нагрузкой. Например, помимо увеличения доли крупномасштабных дефектов (пик на правом крыле распределения рис. 2, *a*), увеличивается также доля мелкомасштабных дефектов (пики на левом крыле). При больших нагрузках обнаруживается также анизотропия указанных распределений по отношению к оси действия нагрузки. В целом все это повышает степень самоподобия рельефа поверхности на разных масштабах и изменяет ее фрактальную размерность.

Фрактальная размерность рельефа поверхности рассчитывалась методом покрытия трехмерной сеткой (Box Accounting). Зависимость фрактальной размерности поверхности от приложенной нагрузки показана на рис. 2, *d*. Фрактальная размерность исходной поверхности (при $\sigma = 0$) равна 2.16 (фрактальность диффузионного типа). При $\sigma = 0.1-1$ GPa размерность падает до 2.04-2.07, наконец перед разрывом при $\sigma = 1.35$ GPa фрактальная размерность боковой поверхности возрастает до значения 1.13.

Следует отметить, что в силу особенности использованного метода СТМ полученные значения фрактальной размерности — это оценки размерности снизу [4].

Мы уже отметили, что под нагрузкой растет анизотропия полуширин пиков и впадин. Это качественно меняет и характер фрактальности, превращая ее из почти симметричной в латеральном направлении в квазиодномерную. Такая фрактальность характерна для поверхности разрыва [5].

Нам представляется, что формирование новой фрактальности на боковой поверхности способствует зарождению зародышевых и магистральной трещины в перпендикулярном направлении, т.е. развитие этой фрактальности — это своеобразный ”поиск” перпендикулярного направления, в котором происходит разрыв образца. В этом случае фрактальность поверхности разрушения — наследие фрактальности, которая сформировалась на боковой поверхности.

Аналогичные эффекты наблюдались нами на изотропно растянутых поверхностях полупроводниковых кристаллов Ge и Si [6]. Отмеченные особенности поведения спектрального и фрактального состояния поверхности в механическом силовом поле позволяют высказать предположение, что одним из механизмов формирования рельефа является поверхностная самодиффузия, усиленная действием внешней нагрузки. Наличие перенапряжений на особенностях рельефа деформированной кристаллической поверхности, приводящих к атермическому рождению дислокаций и вакансий, отмечено в [7]. Возможно, аморфная структура лишь усиливает этот эффект. Увеличение фрактальной размерности поверхности при этом можно истолковать как повышение роли третьего измерения (нормального поверхности) перед разрушением. Мы полагаем, что такое поведение является не только предвестником, но отчасти и причиной формирования очага разрушения на поверхности.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № № 99–02–18287 и 2000–00–00482).

Список литературы

- [1] *Filoché M., Sapoval B.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 25. P. 5776–5779.
- [2] *Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К.* Аморфные материалы. М., 1987. 328 с.
- [3] *Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С., Обидов Б.А.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. В. 10. С. 595–597.
- [4] *Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Корсуков В.Е.* и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 23. С. 58–64.
- [5] *Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J.* // Nature. 1984. V. 308. P. 721–722.
- [6] *Журков С.Н., Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 6. С. 324–326.
- [7] *Tersoff J., LeGoues F.K.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. N 22. P. 3570–3573.