

ВЛИЯНИЕ РАСТЯЖЕНИЯ НА МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ФОЛЬГ МОЛИБДЕНА

**Корсуков В.Е., Гиляров В.Л., Анкудинов А.В., Бутенко П.Н., Вербицкий В.Н.,
Гиляров И.В., Князев С.А., Корсукова М.М., Обидов Б.А.**
*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,
Vjacheslav.Korsukov@mail.ioffe.ru*

Трансформации атомной структуры и рельефа поверхности металлов при термическом и механическом воздействиях представляют интерес, например, для выяснения механизмов деформации и разрушения, для гетерокатализа, для создания новых наноматериалов. В поисках признаков предстоящего разрушения металлов было обращено внимание на развал атомной решетки поверхности, разворот ее блоков, изменение фрактальной размерности и тенденцию перехода из мультифрактального в монофрактальное состояние. Несомненный интерес представляют подобного рода эксперименты на металлах с ОЦК решеткой, поскольку они имеют особый тип дислокационных структур, набор плоскостей скольжения и, соответственно, другие механизмы деформации и разрушения. Результаты таких экспериментов на образцах молибдена и вольфрама представлены в [1-2]. Однако, не был применён мультифрактальный анализ, хотя поверхности в основном мультифрактальны.

Целью настоящей работы является изучение морфологии (атомной структуры и рельефа поверхности) металла с ОЦК решеткой - молибдена в процессе растяжения и установление признаков предстоящего разрыва.

Методами атомной силовой микроскопии (АСМ), дифракции медленных электронов (ДМЭ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) исследовались различные участки поверхности молибденовой фольги с размерами (30x30, 10x10 и 1x1) μm в зависимости от величины приложенного напряжения вплоть до разрыва образца.

Для выявления деталей локального скейлинга, полученные топограммы исследовались методом мультифрактального анализа. В частности, рассчитывался спектр сингулярностей $f(\alpha)$. Алгоритм расчета описан в [3]. Поверхность покрывалась квадратами размера l . В качестве мультифрактальной меры на этой решетке выбиралась высота поверхностного профиля. Вероятность заполнения квадратной ячейки определялась средней высотой профиля (сумма высот точек принадлежащих данной ячейке, нормированная на общую сумму высот рассматриваемого участка поверхностного профиля). Статистическая сумма вычислялась стандартным способом.

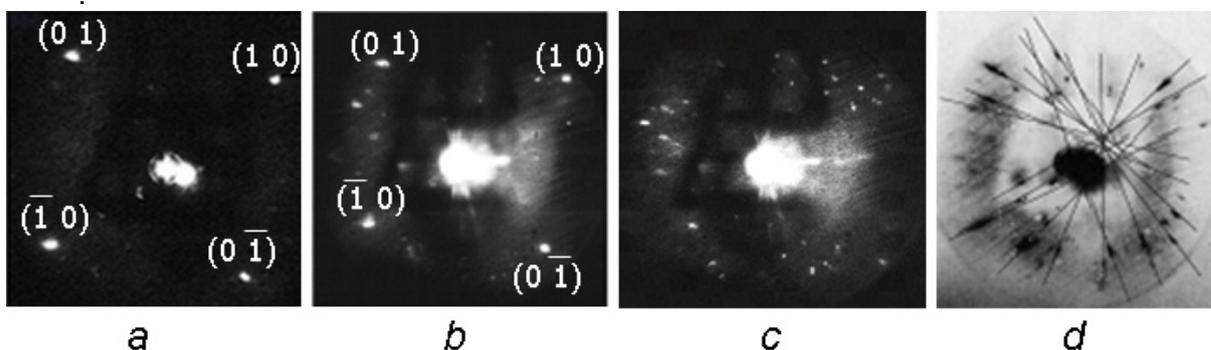


Рисунок 1- Картины дифракции от поверхности Мо. Образец в ненагруженном (а), в нагруженном (b), в предразрывном (с) состоянии. Интегральная картина дифракции нагруженного образца (d).

Далее из нее определялись скейлинговые экспоненты $\tau(q)$, из которых и рассчитывался искомый спектр $f(\alpha)$.

На рис.1 показаны картины ДМЭ после отжига в сверхвысоком вакууме (СВВ). Из Рис. 1a видно, что дифракцию формирует доминирующая грань (100), которая фактически распадается при приложении нагрузки – рис. 1, b,c. Рис.1,d иллюстрирует интегральную картину дифракции для нагруженного образца, которая показывает разворот блоков доминирующей грани в латеральном и перпендикулярном направлениях. Это подробно описано в работе [2].

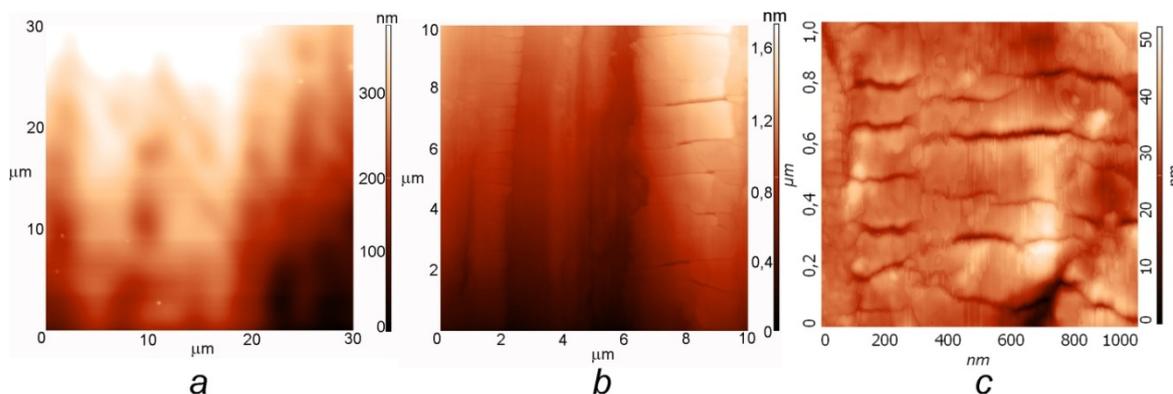


Рисунок 2 - Топограммы поверхности фольги Мо. Образец в ненагруженном (a) и в нагруженном (b) состоянии и после разрыва в области, близкой к разрыву (c).

На Рис. 2 показаны топограммы поверхности до, после нагружения и после разрыва образца в области, близкой к разрыву. Видно, что под нагрузкой меняется рельеф поверхности, причем на рис 2c виден и разворот блоков поверхностной структуры на несколько градусов.

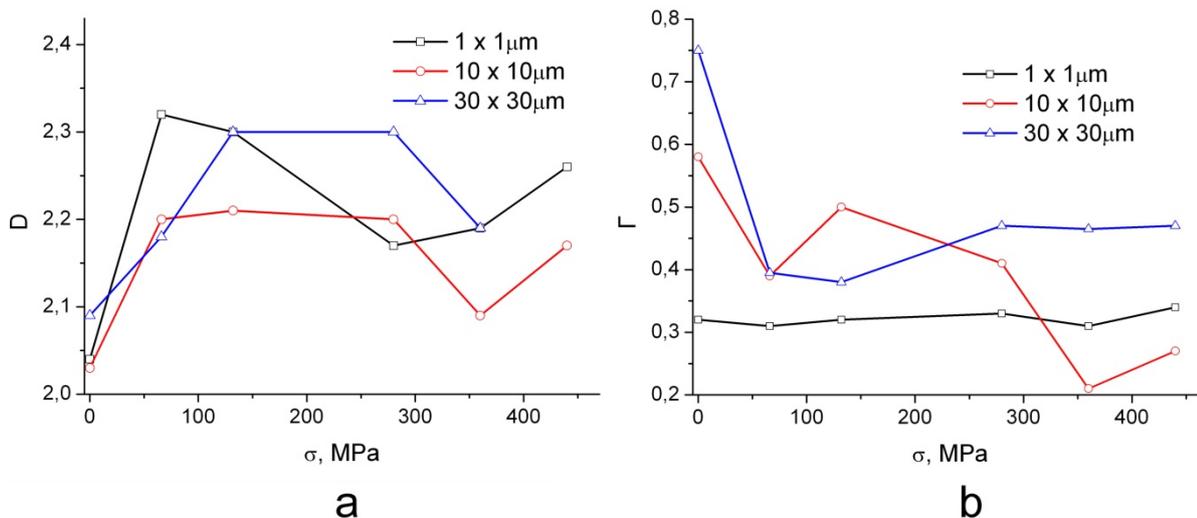


Рисунок 3- Зависимость фрактальной размерности D (a) и ширины спектра сингулярностей (b) от приложенного напряжения.

Из рис. 3a видно, что фрактальная размерность для разных масштабов участков поверхности ведет себя по-разному. Фрактальная размерность (метод покрытий) при нагружении сначала увеличивается, но после формирования магистральной трещины уменьшается. Из Рис. 3b видно, что при приближении к разрыву образца Γ начинает уменьшаться. Интересно отметить, что после разрыва образца Γ увеличивается в 2 раза, т.е. поверхность переходит в мультифрактальное состояние. (Такой рисунок не представлен).

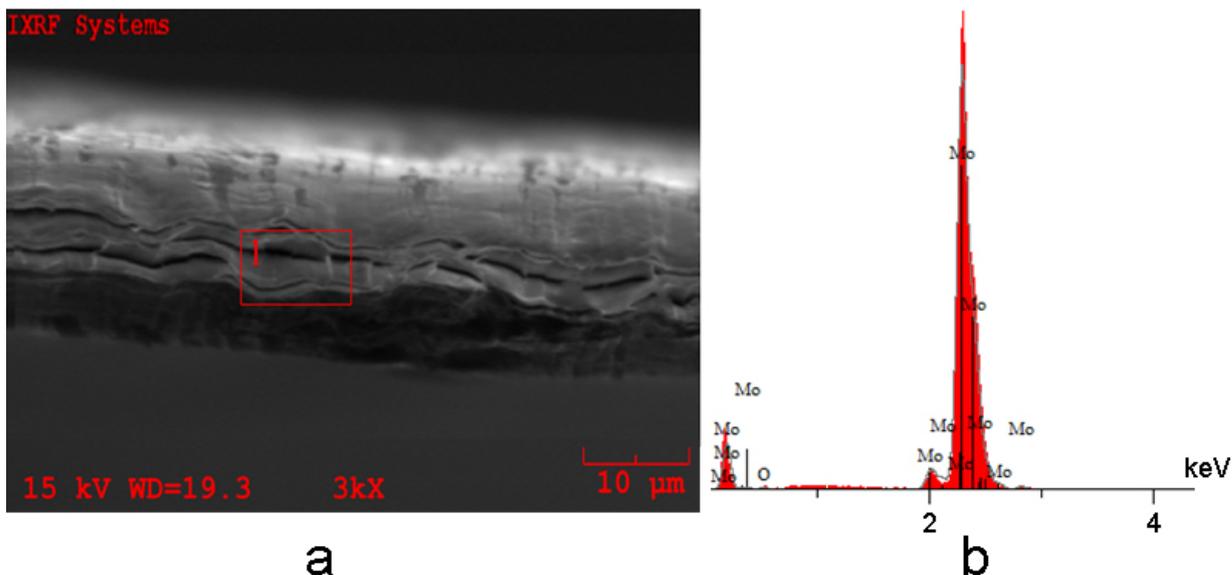


Рисунок 4 - Поверхность разрыва образца Mo (a) и её рентгеновский спектр (b)

Рисунок 4 характеризует химический состав молибденовой фольги. Энергия первичных электронов $E_p = 15 \text{ keV}$. Химический состав поверхности разрыва 97% Mo и 3% O.

Таким образом, показано влияние внешнего напряжения на развал атомной решетки доминирующей грани (100) и на разворот блоков поверхностной решетки (100). Показано, что внешнее напряжение влияет на фрактальную размерность и формирование скейлинга поверхности перед разрывом образца. По нашему мнению, наиболее информативным признаком предстоящего разрыва является сужение ширины спектра сингулярности, т.е. тенденция к монофрактализации поверхности. В рамках нелинейной динамики такое поведение обусловлено изменением характера процесса от более сложного мультифрактального к более простому – монофрактальному, т.е. к фрактальной самоорганизации.

Литература

1. В.Е. Корсуков, С.А. Князев, П.Н. Бутенко, В.Л. Гиляров, М.М. Корсукова, И.А. Няпшаев, Б.А. Обидов, Физика твердого тела – 2017.- 59, в. 2. - С.308-311.
2. В.Е. Корсуков, С.А. Князев, А.В. Анкудинов, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов., Письма в ЖТФ, 2014, 40, в. 6, 35-41.
3. M. Nasehnejad, M. Cholipour Shahraki, G. Nabiyouni. Applied Surface Science, 2016, 389, 735-741.