

# НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ГРИНФЕЛЬДА, КАК МЕХАНИЗМ РЕЛАКСАЦИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ФОЛЬГ МОНОКРИСТАЛЛА АЛЮМИНИЯ (100){001} ПРИ НЕСВОБОДНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

Кузнецов П.В., Беляева И.В., Гунько А.Д.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*  
[kpvt@ispms.tsc.ru](mailto:kpvt@ispms.tsc.ru)

В работах [1, 2] было показано, что на фольгах монокристаллов алюминия  $[100]\langle 001 \rangle$ , наклеенных на плоские образцы высокопрочных сплавов, которые подвергаются циклическому растяжению в упругой области, образуются периодические структуры различного масштаба качественные и количественные параметры которых коррелируют с числом циклов нагружения. Авторы [1,2] предложили использовать подобные фольги в качестве сенсоров накопления усталостных повреждений конструкционных сплавов.

В [3] было установлено, что периодические квадратные решетки, образующиеся на фольгах алюминия, являются самоподобными в диапазоне размеров от долей микрона до нескольких сотен микрон. Эти данные, являются ясным свидетельством самоорганизации деформационной структуры фольг монокристаллов алюминия при их несвободном циклическом растяжении, однако механизм самоорганизации остается невыясненным до настоящего времени.

Целью настоящей работы являлось выяснение механизма образования самоподобных структур на поверхности фольг монокристалла алюминия кубической ориентации при несвободном циклическом растяжении.

На рис.1 показаны самоподобные структуры, наблюдаемые на фольгах монокристалла алюминия при циклическом растяжении.

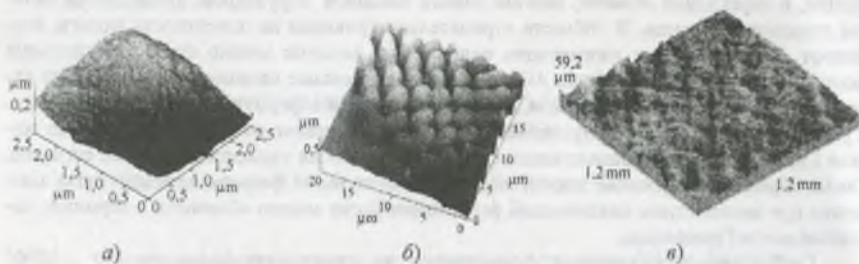


Рис. 1. а) тонкая твидовая структура с периодом  $T_1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ,  $N = 10000$  циклов; б) твидовая структура с периодом  $T_2 \sim 3 \mu\text{m}$ ,  $N = 10000$  циклов; в) грубая твидовая структура с  $T_3 \sim 320 \mu\text{m}$ ,  $N = 100000$  циклов. а), б) – атомно-силовая микроскопия. в) лазерная профилометрия.

Проведенный анализ показал, что при несвободном циклическом растяжении кристаллов алюминия кубической ориентации возрастает роль свободной поверхности фольги и становится возможной релаксация упругой энергии в результате неустойчивости Гринфелда [4]. Неустойчивость Гринфелда имеет чисто упругое происхождение и заключается в следующем. Когда материал имеет поверхность, на которой масса может перераспределяться каким – либо соответствующим транспортным механизмом, твердое тело может понизить свою упругую энергию путем образования поверхностных модуляций.

Длина волны поверхностных модуляций контролируется балансом между упругой энергией, которая стремится к огрублению поверхности и поверхностным натяжением, которое разглаживает ее и в рамках линейного приближения может быть определена как [4]:

$$\lambda > \lambda_c = \frac{\pi \gamma E}{\sigma^2} \quad (1)$$

где  $\gamma$ ,  $E$  и  $\sigma$  — соответственно, поверхностное натяжение, модуль Юнга, и напряжение. Величину дестабилизирующего напряжения и поверхностное натяжение могут быть оценены на основе приближений механики и АСМ измерений, соответственно.

Исследование эволюции неустойчивости Гринфельда в нелинейном приближении предсказывает развитие трещиноподобных углублений или складок.

Сравнение экспериментальных данных с оценками по модели Гринфельда подтверждают нашу гипотезу. В работе [5] впервые было показано, что твидовая структура микронного диапазона (рис.1б) образуется при циклическом растяжении фольг монокристалла алюминия в условиях неустойчивости Гринфельда. Об этом свидетельствуют следующие факты. Экспериментально измеренный период твидовой структуры и высота шаровидных выступов удовлетворительно согласуется с теоретическими оценками на основе модели Гринфельда в линейном приближении. Изменение формы профиля поперечных сечений твидовой структуры с ростом числа циклов нагружения качественно согласуется с результатами численного моделирования эволюции неустойчивости Гринфельда в нелинейном приближении. На этом основании в [5] сделан вывод о том, что твидовая структура микронного диапазона образуется в условиях неустойчивости Гринфельда.

Дальнейший анализ наших экспериментальных результатов показал, что образование тонкой и грубой твидовой структуры также можно объяснить в терминах неустойчивости Гринфельда.

Тонкая твидовая структура с периодом около 0,33 мкм образуется в переходной области между продольными макроскопическими полосами и твидовой структурой микронного диапазона (рис.1а). Ширина области, занятой этой структурой, составляет 10–12 мкм [3].

Как показано в [6] с помощью лазерной профилометрии и атомно-силовой микроскопии, в переходной области, занятой тонкой твидовой структурой, наблюдается сильная локальная кривизна. В области отрицательно кривизны на поверхности фольги, возникают дополнительные сжимающие напряжения, которые можно оценить, используя данные, полученные с помощью АСМ. Это дополнительное сжимающее напряжение ведет к росту локального напряжения, что в соответствии с формулой 1 должно приводить к уменьшению периода образующейся структуры. Сравнение полученной оценки по модели Гринфельда и экспериментальных данных показали их удовлетворительное согласие. Таким образом, образование тонкой твидовой структуры на фольгах монокристалла алюминия при несвободном циклическом растяжении также можно объяснить в терминах неустойчивости Гринфельда.

Грубая твидовая структура формируется на поверхности фольг при  $N > \sim 40000$  циклов нагружения [3]. Вначале на поверхности фольг формируются две системы сопряженных полос локализованной деформации в направлении максимальных касательных напряжений распространяющихся через всю их ширину  $d \sim 10$  мкм. Образование полос локализованной деформации приводит к частичной релаксации напряжений в фольге, что в соответствии с формулой (1) обуславливает огрубление поверхностной структуры. Последующее продолжение циклической деформации фольги приводит при  $N > 100000$  циклов к образованию грубой твидовой структуры (рис.1в) [3]. Имеющиеся данные не позволяют оценить напряжение в фольге и величину поверхностного натяжения. Поэтому, по известному периоду грубой твидовой структуры  $\lambda_3 = 320$  мкм (рис.1в), используя формулу (1), мы оценили величину остаточных напряжений в фольге. Полученное значение  $\sigma_3 = 37$  МПа выше предела текучести алюминия и сравнимо по порядку величины с моментными напряжениями  $\sim 10$  МПа, возникающими в фольге, вследствие внецентренного приложения нагрузки [6]. Последний результат свидетельствует о важной роли моментных напряжений в процессе огрубления поверхности с ростом числа циклов растяжения.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что оценки периода твидовых структур различного масштаба, образующихся при несвободном циклическом растяжении фольг монокристалла алюминия кубической ориентации, удовлетворительно согласуются с моделью нестабильности Гринфелда.

Нестабильность Гринфелда возникает в различных граничных условиях под действием определенных напряжений, что обеспечивает образование твидовых структур различного масштаба и их самоподобие. Образование твидовых структур обеспечивает дополнительный и альтернативный дислокационному скольжению канал снижения упругой энергии нагруженных кристаллов алюминия при напряжении выше предела текучести.

#### Список литературы

1. Gordienko Yu. G., Karuskevich M. V., Zasimchuk E. E. Forecasting the critical state of deformed crystal by the analysis of smart defect structure: fractal characteristics and percolation critical indexes // Proc. of Seventh Conference on Sensor and Their Application, Dublin, Ireland, 1995, p.387.
2. Gordienko Y. G., Zasimchuk E. E., Gontareva R. G. Unconventional deformation modes and surface roughness evolution in Al single crystals under restricted cyclic tension condition // Journal of Materials Science Letters, 2003, 22, p.241.
3. Кузнецов П.В., Петракова И.В., Гордиенко Ю.Г., Засимчук Е.Э., Карбовский В.А. Физ. Мезомех. (2007). -Т.10.- В.6.- С.33-42.
4. Гринфелд М.А. Неустойчивость границы раздела между негидростатически напряженным упругим телом и расплавом // ДАН СССР. (1986) Т. 290. С. 1358.
5. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. О роли нестабильности Гринфелда при формировании твидовой структуры на поверхности кристаллов алюминия при циклическом растяжении // Физ. Мезомех. (2010) – Т.13. - № 1. – С.11-21/.
6. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. Структурно-механические особенности пластической деформации фольг монокристалла  $\langle 001 \rangle \{100\}$  алюминия, наклеенных на плоские образцы алюминиевого сплава при несвободном циклическом растяжении // Физ. Мезомех. (2008) – Т.11. № 6. – С/ 103-114.

### ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОДЛОЖКИ НА СВОЙСТВА ТОПОКОМПОЗИТА

Константинов В.М., Комаров Ф.Ф., Ткаченко Г.А., Пилько В.В.,  
Ковальчук А.В.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
[v\\_m\\_Konst@mail.ru](mailto:v_m_Konst@mail.ru)*

Актуальной задачей современного материаловедения является разработка новых упорочняющих покрытий защищающих поверхность стального изделия от коррозии, изнашивания, механических повреждений. Быстро развивающимися являются технологии тонких наноструктурированных многокомпонентных покрытий. Такие покрытия на поверхности металлических подложек гарантируют высокие нанотвердость, износостойкость и другие механические свойства. Однако система, состоящая из материала подложки и материала защитного поверхностного слоя – топокомпозит, имеет узкую область практического применения. Это обусловлено тем, что эксплуатационные свойства ограничены усилием и нагрузкой, которую может выдерживать подложка без продавливания покрытия. Подтверждением служат известные исследования [1], которые показали, что для тонких твердых покрытий проявляется эффект снижения несущей способности слоистой системы. Этот эффект заключается в снижении предельной нагрузки, действующей на топокомпо-