УДК 539.214:548.4

ДИСКЛИНАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРЫ В УСТОЙЧИВЫХ ПОЛОСАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2010 г.

***Ю.В. Свирина*[1], *В.Н. Перевезенцев*[1, 2]**

[1]Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
[2]Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

svirina@phys.unn.ru

Поступила в редакцию 15.05.2010

Предложена модель формирования лестничной структуры в устойчивых полосах скольжения (УПС) при циклическом нагружении монокристаллов. Компьютерное моделирование эволюции ансамбля дислокаций показывает, что лестничная структура УПС формируется под действием полей внутренних напряжений мезодефектов, возникающих в процессе деформации на границе матрицы и полосы. Структура УПС представляет собой чередующиеся стенки дислокаций разного знака, ориентированные перпендикулярно к линии скольжения дислокаций, расстояние между стенками соответствует ширине бездислокационных каналов в матрице.

Ключевые слова: циклическое нагружение, микроструктура, мезодефекты, компьютерное моделирование.

Введение

В монокристаллах дислокационная структура, возникающая в процессе усталостного нагружения, хорошо изучена [1, 2]. На электронномикроскопических снимках наблюдаются так называемые жилы (области с высокой плотностью дислокаций до значений $\rho \sim 10^{15}$ м$^{-2}$), вытянутые в направлении, совпадающем с направлением линии первичной краевой дислокации (см. рис. 1). Жилы разделены каналами – областями, практически свободными от дислокаций. Как показывают более детальные исследования, жилы состоят преимущественно из краевых дислокаций, причем их суммарный вектор Бюргерса близок к нулю, и они не создают дальнодействующих внутренних полей напряжений [3]. Исследование эволюции структуры образцов, подвергнутых циклическому нагружению, показывает, что при испытаниях на растяжение–сжатие формируются устойчивые, параллельные плоскостям первичного скольжения, полосы скольжения (УПС), распространяющиеся через все поперечное сечение образца [4, 5]. На рис. 1б представлена микроструктура УПС. Такая структура, состоящая из регулярно рас-

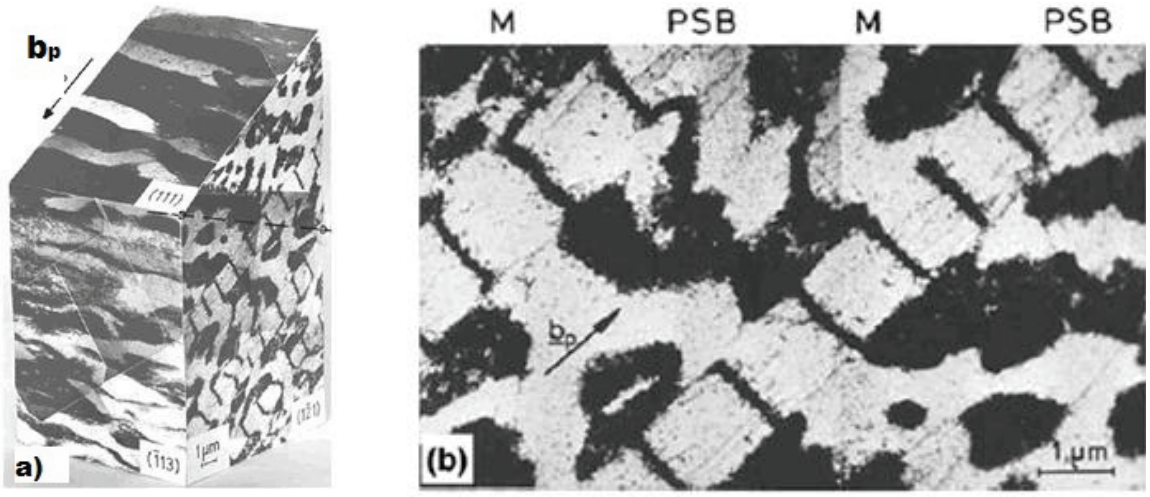


Рис. 1. а) Трехмерное изображение структуры в монокристалле меди после испытаний на усталость (b_p – вектор Бюргерса первичных дислокаций) [4], б) лестничная структура в устойчивых полосах скольжения [5] M – матрица, PSB – устойчивая полоса скольжения

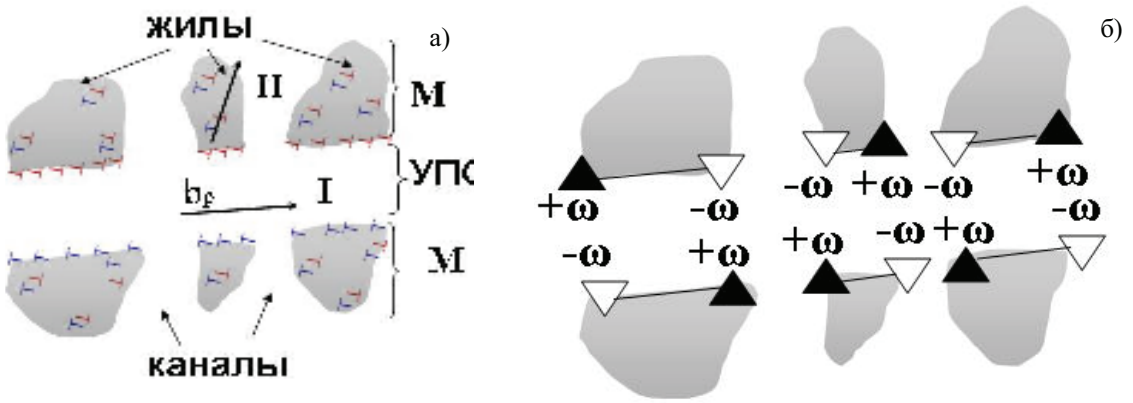


Рис. 2 а) Дислокационная модель микроструктуры, b_p – вектор Бюргерса первичных дислокаций, б) эквивалентная дисклинационная схема структуры, формирующейся вблизи границы полосы

положенных стенок краевых дислокаций, называется лестничной. Расстояние между стенками в лестнице соответствует ширине каналов. Стенки лестничной структуры располагаются перпендикулярно плоскости скольжения первичных дислокаций в УПС.

Несмотря на большое количество теоретических моделей дислокационной структуры УПС [2], большинство из них строится на нахождении равновесной дислокационной структуры, оставляя открытым вопрос о причинах и кинетике ее формирования.

Между тем для более адекватного описания процесса формирования структуры УПС необходимо исследовать самосогласованное движение ансамбля дислокаций как в матрице, так и непосредственно в самой полосе в полях внутренних и внешних напряжений, с учетом соответствующих дислокационных реакций.

Целью настоящей работы является построение физической модели формирования структуры УПС при циклическом нагружении.

Дислокационная модель УПС

Известно, что во многих материалах, таких, например, как медь, сдвиговая деформация в процессе нагружения локализуется в полосах скольжения [6, 7]. Внутри полосы сдвиг идет только по одной (первичной) системе скольжения I (рис. 2а). Взаимодействие разноименных дислокаций, движущихся в первичной системе скольжения, приводит к формированию малоподвижных дислокационных диполей и, как следствие, к упрочнению. Дальнейшее повышение внешнего напряжения активирует вторичную систему скольжения вне полос, в так называемой матрице М (рис. 2а). Можно предположить, что сдвиг в матрице также неоднороден, о чем в случае циклической деформации свидетельствует наличие жил с высокой плотностью дислокаций и каналов, практически свободных от дислокаций. Предположим, что в матрице сдвиг локализован в жилах и идет по единственной вторичной системе скольжения II (рис. 2а). Дислокации вторичной системы, достигая границ полосы, взаимодействуют с первичными дислокациями, движущимися внутри полосы. Как показано в [8], локальные реакции между дислокациями первичной и вторичной системы в гранецентрированных кубических материалах с низкой энергией дефекта упаковки приводят к формированию сидячих дислокаций (барьеров Ломера–Коттрелла), являющихся эффективными препятствиями для дальнейшего движения дислокаций. Таким образом, в некоторой окрестности края полосы будет происходить накопление барьерных дислокаций. Поскольку плотность дислокаций в полосе к моменту активации вторичной системы скольжения достаточно велика, то эти реакции будут происходить в достаточно тонком, по сравнению с толщиной полосы, слое. Накопление дислокаций на границе между УПС и матрицей приводит к локальной разориентировке и может быть эквивалентно представлено как формирование дисклинационных диполей мощности $\omega_i \approx b/h_i$, где h_i – расстояние между дислокациями (рис. 2б). Отметим, что структура, представленная на рис. 2б, имеет суммарный нулевой вектор Бюргерса и, следовательно, не создает дальнодействующих полей напряжений. Тем не менее локальные напряжения от дисклинационных диполей могут оказывать определяющее влияние на перераспределение дефектов внутри полосы.

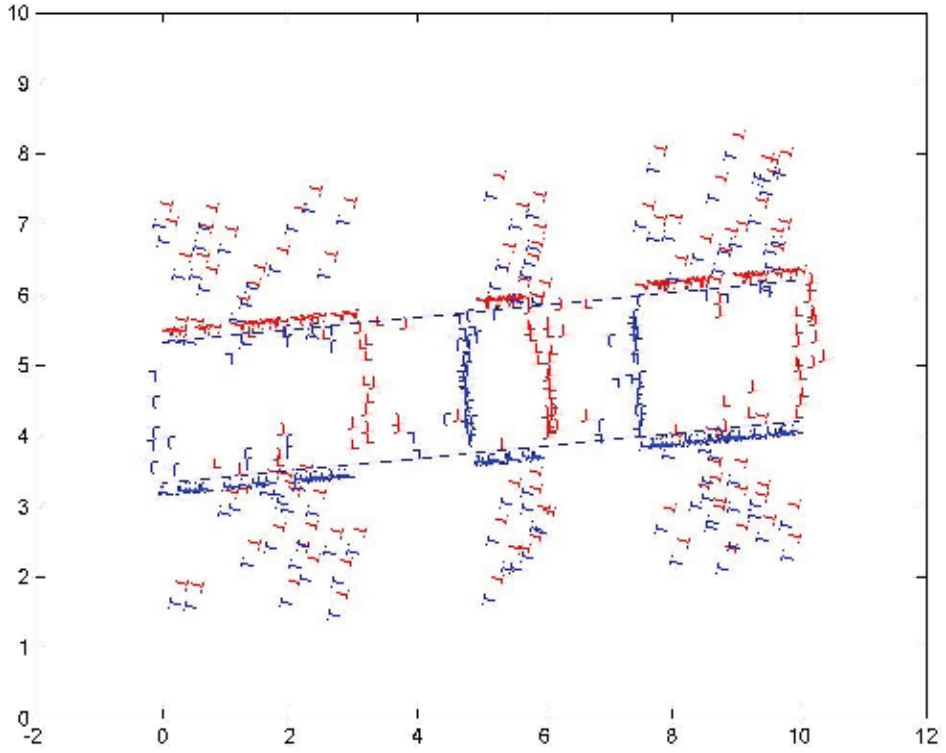


Рис. 3. Дислокационная структура, сформировавшаяся в процессе нагружения

В работе [9] было показано, что упругое поле дисклинации возмущает ламинарный поток дислокаций, что приводит к формированию оборванных субграниц, ориентированных перпендикулярно направлению скольжения дислокаций. Таким образом следует ожидать, что появление дисклинационных диполей на границах УПС также приведет к образованию стенок дислокаций, ориентированных перпендикулярно к первичной системе скольжения.

Изучение условий, при которых формируется лестничная структура УПС, проведем методом компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование динамики дислокационного ансамбля

Рассмотрим самосогласованное движение ансамбля дислокаций в монокристалле, содержащем одну полосу в полях внутренних и внешних напряжений в рамках компьютерной модели, развитой в работах [9, 10]. Будем предполагать, что внутри полосы происходят самосогласованные процессы генерации и движения первичных дислокаций, плоскость скольжения которых ориентирована параллельно УПС. Полоса имеет постоянную ширину и располагается под углом 10^{o} к оси x. Генерация и движение дислокаций по вторичной системе скольжения происходит в жилах матрицы. Плоскость скольжения располагается под углом 60^{o} к оси x. Для генерации дислокаций рассматриваются случайно распределенные источники типа Франка–Рида, аннигиляция дислокаций противоположного знака происходит, если расстояние между ними меньше критического [1]. Движение дислокаций рассматривается в квазивязком приближении. Сток дислокаций осуществляется на свободных поверхностях монокристалла. При расстоянии между первичными и вторичными дислокациями, формирующими неподвижный барьер, меньше критического, дислокации считаются неподвижными. Расчеты проводились для монокристалла размера 10×10 мкм^2 при значении внешнего напряжения $\sigma=3\cdot10^{-3}G$ (G – модуль Юнга), деформация УПС за один цикл составляет 1%.

После включения внешнего поля напряжений сдвиговое напряжение вдоль направления скольжения первичных дислокаций приводит к активации процессов генерации и аннигиляции дислокаций, формируются дисклинационные диполи, препятствующие свободному движению дислокаций. Процесс упрочнения материала приводит к тому, что для поддержания постоянной амплитуды деформации необходимо увеличение внешней нагрузки, что создаст условия для генерации и движения дислокаций во вторичной системе скольжения. Неизбежно возникающие при этом дислокационные реакции на

границе полосы приводят к формированию системы дисклинационных диполей и перераспределению в их упругих полях дислокаций внутри полосы. Сформировавшаяся устойчивая структура представлена на рис. 3. Как видно, она состоит из стенок дислокаций противоположного знака, расположенных перпендикулярно плоскости скольжения дислокаций.

При каждом последующем цикле нагружения компоненты сдвиговых напряжений изменяют знак на противоположный, и дислокации начинают двигаться в противоположном направлении. При этом за счет процессов аннигиляции происходит уменьшение мощности дисклинационных диполей, расположенных на границе полосы. В зависимости от длительности цикла нагружения и плотности накопленных в матрице дислокационных диполей может происходить как незначительное уменьшение мощности диполей (при кратковременном нагружении или при большой плотности дислокационных диполей), так и полное разрушение первоначально сформированной структуры с последующим формированием новой. Однако и в том, и в другом случае расстояние между стенками в лестничной структуре будет очевидно соответствовать ширине каналов, поскольку именно она определяет расстояние между соседними диполями дисклинаций.

Отметим, что формирование системы дисклинационных диполей на границе УПС и стенок разноименных дислокаций внутри УПС, а не дипольных стенок, рассматриваемых в теоретических моделях [3], приведет к возникновению разориентированных областей, которые могут быть определены экспериментально. Подтверждение справедливости предложенной модели может быть проведено прямыми электронно-микроскопическими исследованиями параметров лестничной структуры, включая определение разворотов кристаллической решетки методом дифракции отраженных электронов (EBSD).

Выводы

• Предложена модель формирования лестничной структуры в устойчивых полосах скольжения при циклическом нагружении монокристаллов.

• Компьютерное моделирование эволюции ансамбля дислокаций показывает, что лестничная структура УПС представляет собой чередующиеся стенки дислокаций разного знака, ориентированные перпендикулярно к линии скольжения дислокаций, расстояние между стенками соответствует ширине бездислокационных каналов в матрице.

Авторы выражают признательность фонду РФФИ и Нижегородской области (проекты № 08-02-97041_р, № 09-02-97032_р) за оказанную поддержку.

Список литературы

1. Mughrabi H. // Metallurgical and Materials Transactions A. 2009. V. 40A. P. 1257–1279.

2. Man J., Obrtlík K. and Polák J. // Philosophical Magazine. 2009. 89:1. P. 1295–1336.

3. Boettner R.C. and McEvily A.J. // Acta Metall. 1965. 13. P. 937.

4. Mughrabi H., Ackermann F., Herz K. // Proc. ASTM-NBS-NSF Symp., ASTM ASTP 675 / Ed. by J.T. Fong. ASTM, Philadelphia, PA, 1979. P. 69–105.

5. Mughrabi H. Dislocations and Properties of Real Materials (Conf. Proc.), London: The Institute of Metals, 1984. Book No. 323. P. 244–60.

6. Zhang Z.F., Wang Z.G. // Progress in Materials Science. 2008. **53**. P. 1025–1099.

7. Dmitrieva O., Dondl P.W., Müller S., Raabe D. // Acta Materialia. 2009. **57**. P. 3439–3449.

8. Franciosi P., Berveiller M. and Zaoui A. // Acta Metallurgica. 1980. V. 28. P. 273–283.

9. Сарафанов Г.Ф., Перевезенцев В.Н. // Вопросы материаловедения. 2007. В. 1 (49). С. 5–19.

10. Perevezentsev V.N., Sarafanov G.F. // Materials Science and Engineering A. 2009. V. 503. P. 137–140.

DISCLINATION MODEL OF LADDER STRUCTURE FORMATION IN PERSISTENT SHEAR BANDS UNDER CYCLIC LOADING

Yu.V. Svirina, V.N. Perevezentsev

A model of ladder structure formation in persistent shear bands (PSB) under cyclic loading has been proposed. Computer simulation of dislocation ensemble evolution shows, that the ladder structure of PSB is formed under the influence of mesodefect internal stress fields arising at the interface of PSB and matrix in the process of deformation. The PSB structure consists of alternating opposite-signed dislocation walls aligned perpendicular to the primary slip plane. The distance between the walls correlates with the dislocation-free channel width in the matrix.

Keywords: cyclic loading, microstructure, mesodefects, computer simulation.