

## НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЛОКАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЛОИСТЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{LiF-LiF}:\text{Mg}^{2+}$

© А.В.Никифоров, О.В.Клявин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступила в Редакцию 25 марта 1996 г.)

Изучена дислокационная структура слоистых монокристаллов (СМ)  $\text{LiF-LiF}:\text{Mg}^{2+}$ , деформированных до уровня предела текучести. Установлено, что пластические сдвиги возникают в чистых слоях вблизи границ раздела чистых и легированных магнием слоев в виде линий скольжения. По мере повышения деформирующих напряжений они группируются в полосы скольжения. Измерена плотность дислокационных ямок травления в винтовых  $N_s$  и краевых  $N_e$  полосах скольжения как в чистых, так и в примесных слоях. Обнаружено, что значения  $N_s$  в примесных слоях в 5–6 раз меньше, чем в однородных кристаллах  $\text{LiF}$  такого же состава, а величины  $N_e$  практически не изменяются при переходе из чистых в легированные слои. Полученные результаты связываются с наличием в голове полос скольжения дислокационных скоплений одного знака, создающих далекодействующие локальные напряжения, превышающие в десятки раз внешние приложенные. Этот факт обеспечивает легкое распространение полос скольжения через примесные слои без значительного размножения дислокаций. В результате предел текучести для СМ оказывается в несколько раз ниже, чем у однородных легированных кристаллов  $\text{LiF}$  того же состава.

Известно [1,2], что на начальных стадиях пластической деформации кристаллических твердых тел пластические сдвиги (линии и полосы скольжения, полосы Людерса, двойниковые границы и т. д.) возникают и развиваются пространственно неоднородно и неодновременно по всему объему материала. Такое протекание пластической деформации, особенно характерное для монокристаллов при низких температурах, присуще также и структурно-неоднородным материалам, например слоистым композитам [3]. Однако физические процессы пластической деформации в таких гетерогенных системах на микроуровне практически не изучались.

В настоящей работе с целью упрощения интерпретации экспериментальных данных для исследования были выбраны модельные слоистые композиты — слоистые монокристаллы (СМ)  $\text{LiF-LiF}:\text{Mg}^{2+}$ , механические свойства которых в условиях сжатия и чистого изгиба изучены в [4,5]. СМ состояли из регулярно чередующихся слоев  $\text{LiF}$  одни из которых были легированы магнием в количестве 0.03 wt.%, а другие нет ( $\text{Mg} < 0.002 \text{ wt.}\%$ ). При этом были использованы образцы нескольких

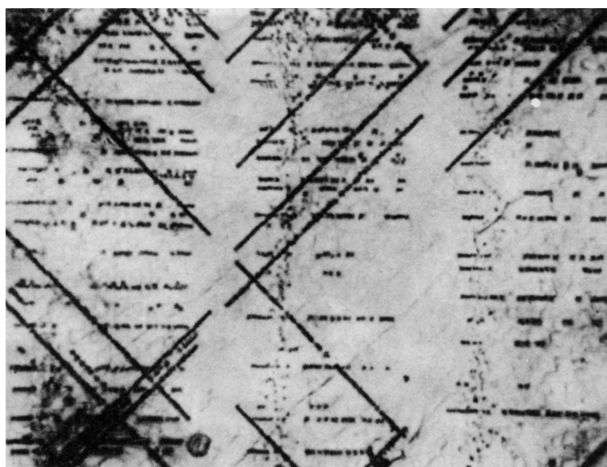


Рис. 1. Дислокационная структура деформированного СМ с краевыми линиями скольжения, заторможенными вблизи границ раздела чистых и легированных слоев.

типов с различной кристаллографической ориентацией слоев относительно оси сжатия.

Необходимо отметить, что предел текучести СМ в опытах на сжатие всего в 2–3 раза превышал предел текучести чистых слоев LiF, хотя последний был примерно на порядок меньше, чем у легированных слоев (21.4 МПа) [4].

Исследования начальных стадий пластической деформации СМ методами фотоупругости и избирательного химического травления на дислокации показали, что независимо от типа образцов пластические сдвиги (линии или полосы скольжения) всегда зарождались в чистых слоях вблизи границ раздела слоев и распространялись в чистых слоях до границ раздела с легированными, задерживаясь на них до появления новых сдвигов. При дальнейшем деформировании полосы скольжения в конечном итоге пересекали примесные слои, причем это не вызывало никаких особенностей на диаграммах нагружения.

На рис. 1 представлена фотография средней части образца СМ, продеформированного до уровня напряжений, несколько превышающих его оптический предел упругости, после травления на дислокации. Видны краевые линии скольжения, расположенные под углом  $45^\circ$  к границам раздела слоев, которые внедрились в примесный слой, но еще не пересекли его, задержавшись вблизи границ раздела слоев. На этом рисунке присутствуют также горизонтальные винтовые линии скольжения, принадлежащие наклонным системам скольжения и заторможенные на границах раздела слоев.

На рис. 2 приведена поляризационно-оптическая картина части деформированного образца СМ после травления на дислокации с заторможенными на границах раздела слоев линиями скольжения, состоящими из краевых дислокаций. Эти линии расположены под углом  $45^\circ$  по отношению к слоям и состоят из краевых дислокаций. На концах линий имеются яркие локальные просветления, что свидетельствует о наличии вблизи них больших дальнедействующих напряжений. Введение в оптическую систему кварцевой пластинки первого порядка по-



Рис. 2. Поляризационно-оптическая и дислокационная картины образца СМ, деформированного до напряжения, превышающего его оптический предел упругости.

звляет получить цветную картину полей внутренних напряжений в образце. Области растяжения дают красную окраску, а области сжатия — синюю (или наоборот в зависимости от ориентации николей). Поскольку на противоположных концах линий скольжения цвет просветлений был разный, можно утверждать, что на одном конце была область растяжения, а на другом — область сжатия. С дислокационной точки зрения это означает избыток дислокаций одного знака вблизи конца линии скольжения и избыток дислокаций противоположного знака на другом конце линии.

Химическое травление позволило установить, что линия скольжения состоит из краевых дислокаций, расположенных в один ряд (рис. 3,а). Схематично это изображено на рис. 3,б.

Величину локальных внутренних напряжений вблизи концов заторможенных линий скольжения можно оценить исходя из следующих предположений: 1) все дислокации находятся в одной плоскости сколь-

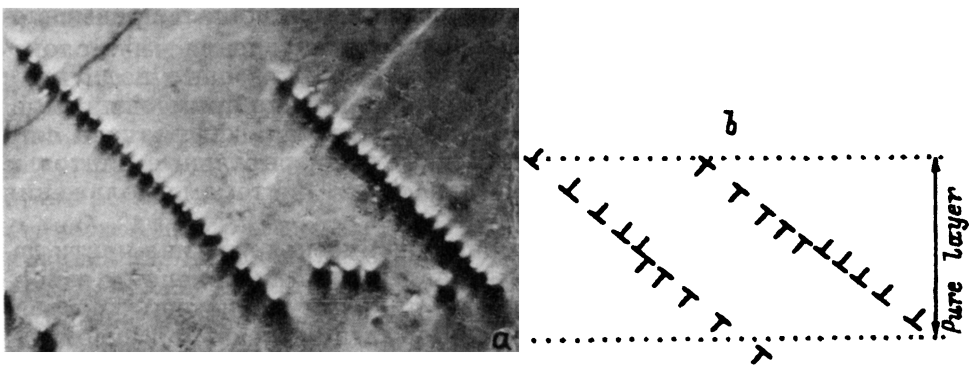


Рис. 3. Структура краевой линии скольжения, состоящая из двустороннего скопления дислокаций противоположных знаков.

а — картина травления, б — схема расположения дислокаций.

жения; 2) в одной половине линии скольжения все дислокации имеют один знак, а в другой — противоположный. Если это так, то линия скольжения в чистом слое, ограниченная с двух сторон легированными областями кристалла, представляет собой двустороннее скопление краевых дислокаций (рис. 3, б). Это скопление эквивалентно двум сверхдислокациям разных знаков, векторы Бюргера которых в  $n/2$  раз больше вектора Бюргера одиночной дислокации [6] ( $n$  — общее число дислокаций в скоплении). Тогда максимально возможные напряжения, создаваемые каждой из них (точнее, силы, действующие на лидирующие дислокации), будут равны  $\pi\tau/2$ , где  $\tau$  — внешнее касательное напряжение в плоскости скольжения.

Общее число дислокационных ямок травления в линии скольжения можно сосчитать в оптический микроскопе. Оно составляет порядка нескольких десятков. Несмотря на такую очень грубую оценку, полагаем, что локальные напряжения в голове линий скольжения, взаимодействующих с легированными слоями еще до их пересечения, по порядку величины превышают приложенное внешнее в десятки раз.

Приведенные соображения объясняют незначительное возрастание предела текучести СМ по сравнению с чистыми однородными кристаллами, т. е. легированные слои показывают слабое сопротивление движущимся линиям скольжения.

Изложенное в равной степени относится и к легированным однородным кристаллам. Так, если на пути краевых полос скольжения описанного выше типа окажется какой-либо точечный дефект, например примесный комплекс, то для дальнейшего их распространения он не будет существенной помехой по причине неизбежного появления вблизи лидирующих дислокаций, взаимодействующих с этим дефектом, больших локальных перенапряжений. Таким образом, можно сделать важный вывод: точечные дефекты практически «прозрачны» для линий и тем более для полос скольжения. По-видимому, по этой же причине коэффициент деформационного упрочнения на второй стадии деформации однородных монокристаллов LiF почти не зависит от концентрации легирующих атомов магния до тех пор, пока не произойдет выпадения фазы  $MgF_2$  [4]. Однако в этом случае частицы второй фазы следует рассматривать уже не как точечные дефекты, а как объемные.

Полученные результаты можно использовать для прогнозирования пластического поведения реальных композиционных материалов. Поскольку в исследованных СМ LiF-LiF:Mg<sup>2+</sup> матрица (чистые слои) и арматура (легированные слои) имели одинаковую совмещенную кристаллическую решетку, идеальную адгезию на границах раздела слоев, одинаковые модули упругости, коэффициенты теплового расширения и т. д., то за счет взаимодействия локальных напряжений в голове полос скольжения пластическая деформация легко развивалась из чистых слоев в примесные. Если бы отмеченные особенности в СМ отсутствовали, то появилась бы несовместность деформаций по разные стороны границ раздела, что в свою очередь привело бы к образованию трещин вблизи границ, т. е. к преждевременному разрушению образцов. Подтверждением этого является интеркристаллитное разрушение бикристаллов [7]. То же самое может происходить и в любых других слоистых и макронеоднородных композиционных материалах.

Для того чтобы избежать расслоений и образования трещин на границах раздела слоев при пластическом деформировании кристаллических композитов, необходимо принять меры для снижения уровня локальных напряжений, возникающих от плоского скопления дислокаций одного знака. Для этого представляется целесообразным создавать искусственные дефекты на границах раздела слоев, например поры, которые служили бы стоками для дислокаций, или между матрицей и арматурой располагать промежуточные вязкие (или аморфные) прослойки для релаксации локальных напряжений. В тех случаях, когда физические и механические свойства матрицы и арматуры сильно отличаются, хорошая адгезия вдоль всей поверхности раздела между слоями, по-видимому, существенно не улучшит пластических свойств композита в целом. Однако предлагаемые способы требуют детальных исследований для конкретного класса материалов и условий их деформирования.

### Список литературы

- [1] Б.И. Смирнов. Дислокационная структура и упорядочение кристаллов. Л. (1981). 235 с.
- [2] Дислокации и механические свойства кристаллов / Под ред. М.В.Классен-Неклюдовой и В.Л.Инденбома. М. (1960). 552 с.
- [3] Композиционные материалы. Разрушение и усталость / Под ред. Л.Браутмана. М. (1978). Т. 5. 483 с.
- [4] А.В. Никифоров, Ю.Г. Носов, М.Б. Мухамеджанова, О.В. Клявин, П.И. Антонов. ФТТ **29**, 2, 485 (1987).
- [5] А.В. Никифоров, Ю.Г. Носов, М.Б. Мухамеджанова, О.В. Клявин. ФТТ **29**, 12, 3611 (1987).
- [6] Дж. Хирт, И. Лоте. Теория дислокаций. М. (1972). 599 с.
- [7] Б.И. Смирнов, Т.Н. Снежкова. ФТТ **19**, 7, 2021 (1977).