

Пороговый характер магнитоэластического эффекта при двойниковании в кристаллах висмута

© А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей

Мозырский государственный педагогический университет,
247760 Мозырь, Белоруссия

E-mail: apinchook@tut.by

(Поступила в Редакцию 31 октября 2003 г.)

В окончательной редакции 29 декабря 2003 г.)

Обнаружено, что пороговый характер магнитоэластического эффекта в кристаллах висмута при одновременном приложении сосредоточенной нагрузки и постоянного магнитного поля заключается в скачкообразном падении средней длины клиновидных двойников на плоскости спайности (111) кристалла и как следствие в скачкообразном уменьшении его суммарного сдвойникового объема. В то же время магнитное поле оказывает стимулирующее воздействие на пластическую деформацию скольжения, в пользу чего свидетельствует увеличение размеров дислокационной розетки. Микротвердость кристаллов плавно изменяется и обнаруживает тенденцию к повышению с увеличением индукции магнитного поля. Последнее явление объясняется упрочнением кристалла под индентором при приложении магнитного поля за счет работы нескольких систем скольжения.

Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований РБ (грант № Ф03-105).

Магнитоэластические эффекты (МЭЭ) при деформации скольжения хорошо известны (см., например, [1,2]). В [3] было обнаружено, что приложение постоянного магнитного поля (МП) уменьшает размеры и число клиновидных двойников. В работах [4,5] предсказан и экспериментально обнаружен пороговый уровень B_c индукции МП, при превышении которого в кристаллах проявляется МЭЭ. Поэтому цель настоящей работы состояла в том, чтобы выяснить следующие вопросы.

1) Существует ли пороговое поле B_c в случае двойникования в кристаллах висмута, по достижении которого средняя длина L клиновидных двойников уменьшается скачком?

2) Сопровождается ли скачкообразное падение L одновременным увеличением размеров дислокационной розетки?

3) Как ведет себя микротвердость образцов H с ростом индукции МП?

Для исследования использовались монокристаллы висмута, выращенные по методу Бриджмена из сырья чистотой 99.97 wt.% (с примесью свинца). Измерения проводились на свежесколотой плоскости спайности (111) кристаллов висмута. Образцы имели вид прямоугольных призм размером $10 \times 5 \times 5$ mm. Исследования проводились с помощью микротвердомера ПМТ-3, алмазная пирамидка которого создавала сосредоточенную нагрузку.

Все детали установки для крепления и нагружения образца в МП были изготовлены из немагнитных металлов, что позволило исключить инструментальные эффекты. Отсутствие артефактов было подтверждено специальным контрольным опытом. Включение-выключение МП не приводило к изменениям размеров отпечатков, получаемых при нулевой нагрузке на штоке индентора. Образец располагался в геометрическом центре зазора

сердечника электромагнита. Измерения, выполненные с помощью датчика Холла, показали, что относительное изменение поля вдоль образца не превышало 2–3%. Нагружение образца происходило одновременно с его экспозицией в МП. Индукция МП варьировалась в интервале $B = 0–0.9$ Т. Время выдержки образца в МП составляло 5 min. Сила тяжести груза на штоке индентора была равна $P = 0.14$ Н. Непосредственно измерялись диагонали отпечатков пирамидки, длина и ширина устья клиновидных двойников, а также их число. Усреднение проводилось по результатам измерений двадцати отпечатков индентора. Погрешность измерений не превышала 3%.

Мерой пластической деформации, реализующейся при двойниковании, может служить суммарный сдвойникованный объем $\sum V_{tw}$ [6,7]. Объем клиновидного двойника с толщиной у устья h можно найти, используя формулу для нахождения объема шарового сегмента. Учитывая, что объем двойника V_{tw} равен половине объема шарового сегмента, а также принимая во внимание то, что $r \approx L$ (r — радиус основания сегмента), получим $V_{tw} = \frac{1}{24} \pi h^2 (3L - \frac{h}{2})$. Суммарный сдвойникованный объем находился по формуле $\sum V_{tw} = V_{tw} N$, где N — число двойников.

Для определения размеров областей поверхности кристалла, упрочненных в результате скольжения с полем и без него, строилась зависимость отношения $\frac{\Delta H}{H}$, являющегося мерой деформационного упрочнения [8], от расстояния до центра предварительного укола l . Здесь $\Delta H = H' - H$ — разность микротвердостей деформированных (H') и недеформированных (H) областей поверхности кристалла. В данном случае представляло интерес не точное значение микротвердости, а зависимость $\frac{\Delta H}{H}(l)$, позволяющая сравнить размеры областей, упрочненных с полем и без него. Поскольку в случае малых нагрузок корректная оценка размеров упрочня-

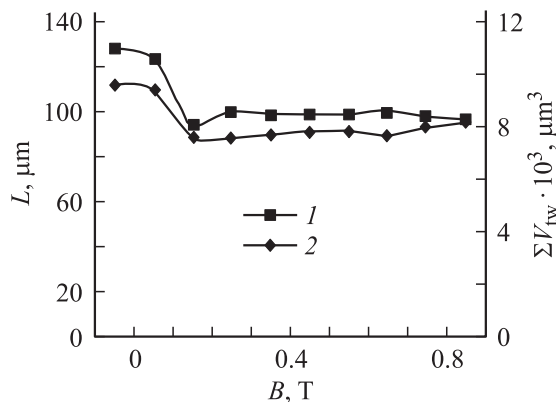


Рис. 1. Зависимость средней длины клиновидных двойников L на плоскости спайности кристаллов висмута (1) и суммарного сдвойникового объема $\sum V_{tw}$ (2) от индукции B магнитного поля.

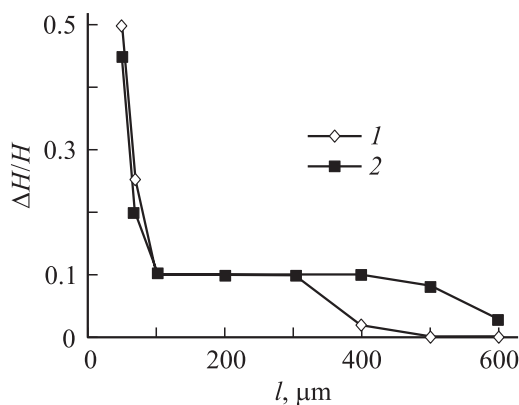


Рис. 2. Зависимость отношения $\Delta H/H$ от расстояния до центра предварительного укола l . 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в магнитном поле.

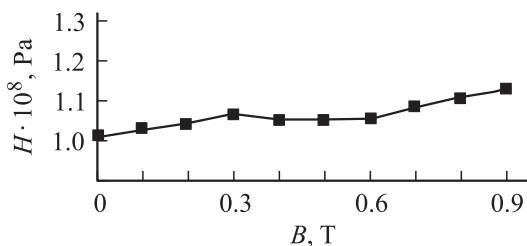


Рис. 3. Зависимость микротвердости кристаллов висмута H от индукции магнитного поля B .

емых областей затруднительна, предварительный укол делался при сравнительно большой нагрузке ($P = 0.8 \text{ N}$) не индентор. Значения H' и H получались при малой нагрузке ($P = 0.01 \text{ N}$) без приложения МП.

Из поведения кривой 1 на рис. 1 видно, что для кристаллов висмута существует пороговое значение МП с индукцией, приблизительно равной $B \sim 0.2 \text{ T}$, по достижении которого средняя длина клиновидных двойников L на плоскости спайности (111) скачкообразно уменьшается. Отсюда следует, что пороговый характер

МПЭ в двойникующихся кристаллах висмута состоит в скачкообразном падении средней длины пробега двойникующихся дислокаций $\lambda = \sum_i L_i / 2N$. Поскольку средняя толщина клиновидных двойников у устья h постоянна в пределах экспериментальной погрешности, количество двойникующихся дислокаций на границе двойник-матрица, равно h/a , также остается неизменным.

Установлено, что падение L является основной причиной скачкообразного уменьшения суммарного сдвойникового объема $\sum V_{tw}$ при $B \sim 0.2 \text{ T}$ (кривая 2 на рис. 1), так как число двойников N не меняется в пределах экспериментальной погрешности.

Сравнивая поведение зависимости отношения $\frac{\Delta H}{H}$ от расстояния до центра предварительного укола l в поле и без него (соответственно кривые 2 и 1 на рис. 2), можно сделать вывод, что приложение МП существенно увеличивает размеры упрочненных областей поверхности кристалла. В том случае, когда индукция МП достигает значения $B \sim 0.2 \text{ T}$, отношение $\frac{\Delta H}{H}$ уменьшается до нуля при больших значениях l . Данное обстоятельство свидетельствует в пользу того, что размеры дислокационной розетки увеличиваются скачком.

В то же время, согласно нашим опытным данным, H изменяется плавно и в области больших значений B обнаруживает тенденцию к увеличению (рис. 3). Эту зависимость можно объяснить следующим образом. В [9] высказано предположение, что высокий коэффициент доформационного упрочнения в области кристалла под индентором может быть обусловлен работой всех пересекающихся систем скольжения. Для выяснения вопроса о том, стимулирует ли МП работу всех систем скольжения, нами был проведен специальный эксперимент. Известно [10], что дислокационная розетка на плоскости спайности (111) кристаллов висмута состоит из ямок травления, образующих два равносторонних треугольника. Вершины одного из них лежат на направлениях $\langle \bar{1}\bar{1}2 \rangle$, а другого — на направлениях $\langle 11\bar{2} \rangle$. Первый треугольник состоит из дислокационных рядов, принадлежащих плоскостям $\{11\bar{1}\}$, образующим тупой угол с направлением действия силы. Второй треугольник состоит из дислокационных рядов, принадлежащих плоскостям $\{11\bar{1}\}$, образующим острый угол с направлением действия силы. При комнатных температурах без приложения внешних полей вокруг отпечатков формируются только треугольники первого типа, поскольку двойники препятствуют формированию дислокационных рядов второго типа [10]. Проведенное нами исследование зависимости $\frac{\Delta H}{H}(l)$ как для направлений $\langle \bar{1}\bar{1}2 \rangle$, так и для направлений $\langle 11\bar{2} \rangle$ показало, что в обоих случаях поведение $\frac{\Delta H}{H}(l)$ совпадает в пределах экспериментальной погрешности с ходом кривой 2 на рис. 2. Таким образом, полученные опытные данные свидетельствуют о том, что приложение МП стимулирует работу всех плоскостей скольжения. Возникающее в результате этого деформационное упрочнение объясняет тот факт, что микротвердость не уменьшается при пластифицирующем влиянии МП.

Список литературы

- [1] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова. ФТТ **41**, 6, 1035 (1999).
- [2] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, Л.И. Гончар. ЖЭТФ **120**, 1(7), 134 (2001).
- [3] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. ФТТ **43**, 1, 39 (2001).
- [4] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Письма в ЖЭТФ **63**, 8, 628 (1996).
- [5] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова. ФТТ **40**, 1, 81 (1998).
- [6] А.И. Пинчук. Металлофизика и новейшие технологии **22**, 3, 88 (2000).
- [7] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. Металлофизика и новейшие технологии **22**, 12, 43 (2000).
- [8] Ю.С. Боярская, Д.З. Грабко, М.С. Кац. Физика процессов микроиндентирования. Штиинца, Кишинев (1986). 294 с.
- [9] З.К. Саралидзе, М.В. Галусташвили, Д.Г. Дрияев. ФТТ **41**, 11, 1999 (1999).
- [10] Д.З. Грабко, Ю.С. Боярская, Н.П. Дынту. Механические свойства полуметаллов типа висмута. Штиинца, Кишинев (1982). 134 с.