

Магнитоэластический эффект в случае двойникования кристаллов висмута под воздействием сосредоточенной нагрузки

© А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей

Мозырский государственный педагогический институт,

247760 Мозырь, Белоруссия

E-mail: APinchook@usa.net

(Поступила в окончательном виде 29 мая 2000 г.)

Обнаружено, что двойникование в кристаллах висмута, возникающее при воздействии сосредоточенной нагрузки, частично подавляется приложением постоянного магнитного поля. Исследованы основные закономерности влияния однородного магнитного поля постоянной величины на двойникование монокристаллов висмута при длительном воздействии сосредоточенной нагрузки. Получено, что в присутствии магнитного поля длина и число клиновидных двойников, заклинившихся у отпечатка индентора, уменьшаются. Это свидетельствует о снижении подвижности частичных двойнивающих дислокаций и интенсивности процесса зарождения клиновидных двойниковых прослоек в постоянном магнитном поле. В то же время приложение магнитного поля увеличивает толщину двойников у устья. Установлено, что анизотропия магнитоэластического эффекта в случае двойникования отсутствует.

Настоящая работа была выполнена при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант № Т97М-170).

В последнее десятилетие несколько независимых групп исследователей как в России, так и в других странах активно исследуют магнитоэластический эффект в металлах (МПЭ) [1–4]. Несмотря на значительные достижения в области МПЭ, практически не изучен вопрос о влиянии магнитного поля (МП) на такой же важнейший вид кристаллографического формоизменения, как двойникование.

Согласно современным представлениям о природе МПЭ, внешнее магнитное поле приводит к откреплению полных дислокаций от парамагнитных примесей в результате спин-зависимых переходов в системе дислокация–примесный центр и их последующему перемещению в поле упругих напряжений. В ядрах частичных двойнивающих дислокаций оборванные межатомные связи отсутствуют [5], поэтому они могут иметь меньшее количество парамагнитных центров в ядрах по сравнению с полными дислокациями. Следовательно, экспериментальное изучение магнитоэластического эффекта в металлах, где пластическая деформация реализуется перемещением как полных, так и частичных дислокаций, т.е. одновременно скольжением и двойникованием, может способствовать углублению представлений о физических механизмах МПЭ.

1. Материал и методика эксперимента

Для исследования использовались монокристаллы висмута, выращенные по методу Бриджмена из сырья чистотой 99.97% (с примесью свинца). Раскальванием монокристалла висмута по плоскости спайности (111) получалась гладкая поверхность, пригодная к исследованию без дальнейшей обработки. Образцы имели вид прямоугольных призм и размеры $10 \times 5 \times 5$ мм. В [6]

показано, что продолжительность выдержки образца в воздушной среде практически не влияет на микромеханические характеристики кристаллов висмута. Исследования проводились с помощью микротвердомера ПМЕ-3, алмазная пирамидка которого создавала сосредоточенную нагрузку. Специальная установка для помещения образца в магнитное поле позволила исключить инструментальные эффекты, т.е. искажение магнитного потока ферромагнитными частями оборудования и возникновение сил максвелловского давления. Детали экспериментального оборудования, оправка алмазной пирамидки, грузы на штоке индентора были изготовлены из неферромагнитных материалов (медь, латунь). Специально проведенные контрольные опыты показали, что действие МП на элементы измерительной аппаратуры не приводит к инструментальным эффектам. Размеры отпечатка алмазной пирамидки, полученные при отсутствии груза на штоке индентора, не увеличивались и не уменьшались с ростом индукции МП. Подробно экспериментальная установка описана в [7].

Во избежание искажения магнитного потока стальным поворотным столиком микротвердомера ПМТ-3 образец располагался на высоте 10 см от столика в геометрическом центре зазора сердечника электромагнита. Измерения, выполненные с помощью датчика Холла, показали, что относительное изменение поля вдоль образца не превышало 2–3%.

Индентор вдавливался в плоскость спайности (111) кристаллов висмута. Экспозиция образца в МП происходила одновременно с его микроиндентированием. Изучались клиновидные двойники системы $\{110\}\{001\}$. Три плоскости двойникования в этом случае располагаются под углом 120° симметрично нагрузке. Индукция магнитного поля в зазоре сердечника электромагнита, куда помещался образец, была постоянна и равна $B = 0.2$ Т.

Время выдержки t образца в магнитном поле составляло 5, 15, 30, 60 и 120 минут. Сила тяжести груза на штоке индентора была равна $P = 0.14$ Н. С помощью окуляр-микрометра ПМТ-3 непосредственно измерялись длина клиновидных двойников L , ширина двойников у устья h и число двойниковых прослоек N . Усреднение проводилось по результатам измерений двойниковых прослоек, заклинившихся вокруг 20 отпечатков индентора. Погрешность измерений не превышала 3%.

2. Результаты измерений и обсуждение

Обнаружено, что включение и выключение магнитного поля до приложения нагрузки не меняет картину пластической деформации. МПЭ в кристаллах висмута наблюдался в том случае, когда МП и сосредоточенная нагрузка одновременно прилагались к образцу. Обращение знака поля не вносило изменений в картину пластической деформации.

Экспериментально получено, что длина клиновидных двойников в присутствии МП существенно меньше, чем без поля (кривые 2 и 1 на рис. 1 соответственно). Этот факт свидетельствует об уменьшении пробега двойникующих дислокаций при приложении магнитного поля к образцу. Из рис. 1 можно видеть, что в интервале времен $t = 5\text{--}120$ мин воздействие сосредоточенной нагрузки практически не изменяет длину двойников L как при приложении МП, так и без него. Все экспериментальные зависимости построены в полулогарифмических координатах (на всех графиках по горизонтальной оси отложен логарим времени воздействия сосредоточенной нагрузки $\ln t$). Светлые точки на экспериментальных зависимостях получены без приложения поля к образцу, темные точки получены при приложении МП к кристаллам висмута.

Из рис. 2 видно, что среднее число клиновидных двойников N обнаруживает рост при увеличении t , но в магнитном поле этот процесс частично подавляется. Возможная причина может быть в том, что приложение МП затрудняет трансляцию двойникующих дислокаций в плоскости двойникования, тем самым увеличивая величину обратных запирающих напряжений, действующих на источники двойникующих дислокаций в устье двойника [8].

Приложение магнитного поля к образцу стимулирует размножение двойникующих дислокаций на готовых

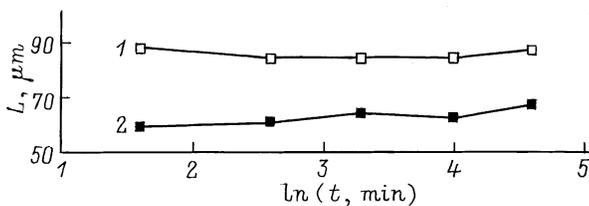


Рис. 1. Зависимость средней длины двойника L от времени воздействия t сосредоточенной нагрузки. 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в магнитном поле.

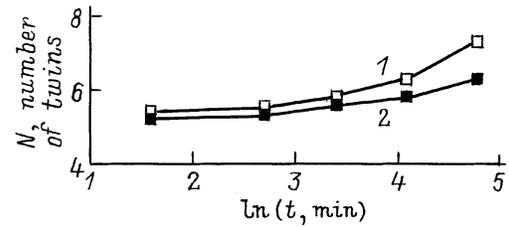


Рис. 2. Среднее число клиновидных двойников N у отпечатка индентора в зависимости от времени воздействия t сосредоточенной нагрузки. 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в магнитном поле.

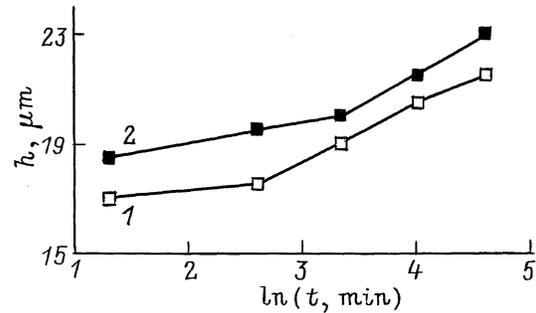


Рис. 3. Зависимость средней ширины h двойника у устья от времени воздействия t сосредоточенной нагрузки в магнитном поле (2) — и в отсутствие поля (1).

границах раздела двойник–матрица, поскольку ширина двойников у устья h больше в присутствии магнитного поля (кривая 2 на рис. 3), чем без МП (кривая 1 на рис. 3). Физическая причина этого явления пока не ясна, поскольку обратные запирающие напряжения, действующие на источники двойникующих дислокаций, расположенные в устье двойника, должны расти с уменьшением длины двойника.

В [9] сообщалось, что МПЭ зависит от взаимной ориентации дислокации L , ее вектора Бюргера \mathbf{b} и магнитной индукции \mathbf{B} . Анизотропия эффекта влияния МП на двойникование (если таковая существует) может быть найдена следующим образом. Считая клиновидные механические двойники, заклинившиеся у отпечатка индентора, отрезками, можно произвести статистический подсчет суммы абсолютных значений проекций всех отрезков на положительное, L^+ , и отрицательное, L^- , направление оси. В первом случае ось была параллельна вектору магнитной индукции, во втором случае — перпендикулярна ему. Эксперимент обнаруживает независимость отношения L^+/L^- от времени воздействия сосредоточенной нагрузки как для одной, так и для другой оси. Величина L^+/L^- ведет себя сходным образом при отсутствии магнитного поля. Численные значения отношения L^+/L^- неизменны как с полем, так и без него при условии, что t одинаково. Таким образом, анизотропия МПЭ в случае двойникования кристаллов висмута отсутствует. Разность в численных значениях L^+/L^- для

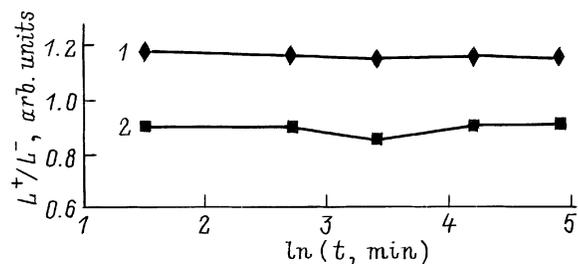


Рис. 4. Зависимость отношения L^+/L^- от $\ln t$. 1 — ось параллельна вектору магнитной индукции, 2 — ось перпендикулярна вектору магнитной индукции.

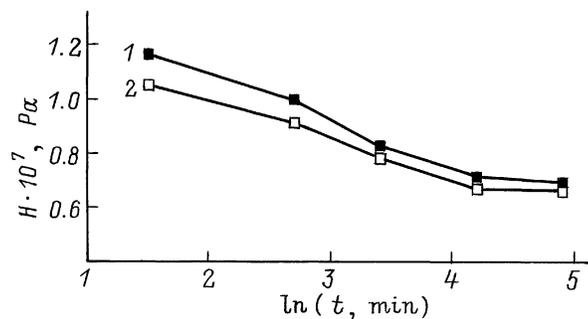


Рис. 5. Зависимость микротвердости H от времени воздействия сосредоточенной нагрузки при приложении (1) и без приложения МП (2).

кривых 1 и 2 рис. 4 обусловлена ориентацией индентора относительно плоскостей двойникования. Каждая точка на графиках получена при одной и той же ориентации алмазного индентора относительно плоскостей $\{110\}$.

Интерпретация физических явлений, наблюдаемых в настоящей работе, следующая. Двойникование является энергоемким процессом. Работа силы тяжести груза на штоке индентора расходуется на зарождение и рост двойников. Но скорость процесса двойникования велика по сравнению со скольжением (сотни метров в секунду) [10,11]. Поэтому двойники быстро уносят упругую энергию от концентраторов напряжений. Для скольжения, реализуемого перемещением полных дислокаций в плоскостях $\{11\bar{1}\}$ [12], требуются значительно меньшие скальвающие напряжения, но этот процесс идет сравнительно медленно. Силовое влияние МП на дислокации исключено в силу однородности магнитного поля. Поскольку магнитное поле было постоянным, тепловой разогрев образца вихревыми токами и пинчевание электронно-дырочной плазмы образцов исключались. В [13–16] указывается, что МП увеличивает подвижность полных дислокаций за счет их открепления от парамагнитных стопоров или распада последних на более мелкие. Это может приводить к частичному подавлению двойникования. Эксперименты, проведенные авторами, показали, что размеры дислокационных розеток, состоящих из рядов полных дислокаций, значительно

больше в случае приложения МП к кристаллам висмута. Влияние МП на частичные двойнивающие дислокации, по-видимому, менее значительно, поскольку они обрабатывают меньшим числом парамагнитных центров в ядрах. Разумеется, данные вопросы нуждаются в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях.

Получено, что микротвердость H обнаруживает чувствительность к магнитному полю (рис. 5). При малых t микротвердость H больше в присутствии МП. Причиной может быть частичное подавление двойникования магнитным полем. Далее по мере развития скольжения с ростом t H уменьшается и сравнивается со значением микротвердости, получаемым в отсутствие МП.

Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **33**, 10, 3001 (1991).
- [2] М.И. Молоцкий. ФТТ **33**, 10, 3112 (1991).
- [3] M.I. Molotskii, R.E. Kris, V.N. Flerov. Phys. Rev. **B51**, 1253 (1995).
- [4] Yu.I. Golovin, R.B. Morgunov. Chem. Rev. **23**, 23 (1998).
- [5] А.М. Косевич, В.С. Бойко. УФН **104**, 2, 201 (1971).
- [6] G.P. Upit, S.A. Varchenya, I.P. Spalvin. Phys. Stat. Sol. **15**, 617 (1966).
- [7] A.I. Pinchook, V.S. Savenko. J. Appl. Phys. **86**, 5, 2479 (1999).
- [8] М.В. Классен-Неклюдова. Механическое двойникование кристаллов. Изд-во АН СССР, М. (1960). 262 с.
- [9] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 2, 320 (1993).
- [10] В.И. Башмаков, Л.А. Скалько, Н.Г. Яковенко. ФММ **28**, 5, 936 (1969).
- [11] В.И. Башмаков, Т.С. Чикова. ДАН СССР **259**, 3, 582 (1981).
- [12] Д.З. Грабко, Ю.С. Боярская, Н.П. Дынту. Механические свойства полуметаллов типа висмута. Штиинца, Кишинев (1982). 134 с.
- [13] M.I. Molotskii, V.N. Flerov. Phys. Rev. **B52**, 12 829 (1995).
- [14] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, А.И. Тюрин, В.И. Иволгин. Докл. РАН **361**, 352 (1998).
- [15] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. ЖЭТФ **115**, 605 (1999).
- [16] M.I. Molotskii, V.N. Flerov. Phys. Rev. Lett. **78**, 2779 (1997).