

## ФІЗИКА

УДК 669.046:539.4.019.3

*А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей***ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
И ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
НА СРЕДНЮЮ ЛИНЕЙНУЮ ПЛОТНОСТЬ  
ДВОЙНИКУЮЩИХ ДИСЛОКАЦИЙ**

В последние десятилетия широко изучается влияние внешнего электрического и магнитного полей на пластичность и прочность металлов. Физические механизмы этих процессов требуют дополнительных исследований [1].

В работе [2] была выдвинута концепция динамической неравновесности дислокационного ансамбля, согласно которой эффект повышения пластичности осуществляется за счет энергии внутренних напряжений, накопленных в процессе предварительной пластической деформации, при активирующем воздействии импульсов тока большой плотности.

Для экспериментального подтверждения этой теории необходимо рассмотреть поведение металла в процессе его пластического деформирования на уровне отдельных дислокационных ансамблей. Это связано с неоднородностью пластической деформации как в пространстве, так и во времени [3]. Пространственная неоднородность обусловлена локализацией деформации в полосах скольжения, т.е. с накоплением в кристалле локальных и незавершенных сдвигов. Удобным модельным объектом являются клиновидные двойники, образующиеся при вдавливании алмазного индентора в плоскость спайности (111) кристаллов висмута. Процесс пластической деформации при механическом двойниковании локализован на границе двойника [4]. Это дает основания полагать, что изучение движения границ двойника позволит понять основные закономерности пластического течения материала при одновременном воздействии механической нагрузки и электромагнитного поля. С этой целью изучалось совместное влияние импульсов тока и/или постоянного магнитного поля (постоянного МП) на среднюю линейную плотность двойникующих дислокаций ( $\rho$ ).

Для исследований использовались монокристаллы висмута, выращенные по методу Бриджмена из сырья чистой 99,97 % (с примесью свинца). Раскалыванием монокристалла висмута по плоскости спайности (111) получалась гладкая поверхность, пригодная к исследованиям без дальнейшей обработки. Образцы имели вид прямоугольных призм и размеры  $10 \times 5 \times 5$  мм. Исследования проводились с помощью микротвердомера ПМТ-3. Созданная нами установка для помещения образца в магнитное поле позволила исключить инструментальные эффекты, возникающие при наложении на образец постоянного МП.

Алмазный индентор вдавливался в плоскость спайности (111) кристаллов висмута. Образец выдерживался в первой серии опытов под нагрузкой без приложения поля и с приложением магнитного поля в течение 20 сек, после чего пропускался импульс тока. Во второй серии опытов в течение длительного времени к образцу прилагались постоянное МП и сосредоточенная нагрузка. Изучались клиновидные двойники системы  $\{110\}\langle 001 \rangle$ . Средняя линейная плотность двойникующих дислокаций на границах раздела двойник-матрица находилась по формуле  $\rho = h/La$ , где  $a$  - параметр кристаллической решетки в направлении, перпендикулярном движению двойникующих дислокаций.

В первой серии опытов изучалась зависимость  $\rho$  от веса груза  $P$  на штоке индентора с одновременным воздействием постоянного МП с индукцией  $B = 0.2$  Тл и импульсов тока плотностью  $j_{\text{imp}} = 40$  А/мм<sup>2</sup>. Во второй серии изучалась зависимость  $\rho$  от времени  $t$  одновременного воздействия на кристалл висмута статической сосредоточенной нагрузки и посто-

янного МП с индукцией  $B=0.2$  Тл. В обоих случаях постоянное МП было параллельно плоскости спайности (111).

Экспериментальная погрешность не превышала 3%. Подробно использовавшаяся методика и оборудование описаны в работе [4].

На рис.1 показана зависимость средней линейной плотности двойникующих дислокаций ( $\rho$ ) от веса ( $P$ ) груза на штоке индентора. Линия  $a$  на рис.1 соответствует случаю вдавливания алмазного индентора в плоскость (111) в течении 20с без воздействия электромагнитного поля на кристалл. В этом случае  $\rho$  остается постоянной в пределах экспериментальной погрешности. Поскольку отношение  $L/h$  есть дистанция между двойникующими дислокациями, выраженная в межатомных расстояниях, то из рис.1 можно сделать вывод, что среднее междислокационное расстояние остается стабильным и силы отталкивания между одноименными двойникующими дислокациями неизменны.

Кривые  $b$  и  $c$  на рис.1 показывают, что одновременное приложение постоянного МП и пропускание импульсов тока качественно меняет картину пластической деформации. Кривая  $b$  на рис.1 соответствует положительному заряду от холловской поляризации образца на плоскости спайности (111), кривая  $c$  на рис.1 – отрицательному заряду на этой же плоскости. В этом случае имеет место ярко выраженный эффект падения средней плотности двойникующих дислокаций  $\rho$ . Наблюдаемый эффект заметно возрастет с увеличением  $P$ . В этом случае междислокационное расстояние увеличивается. С точки зрения энергетического подхода, последний экспериментальный результат означает, что рост двойниковой прослойки, т.е. удлинение клиновидного двойника, происходит за счет снижения энергии локальных упругих напряжений, запасенных в ходе предварительной пластической деформации. Приложение постоянного МП и пропускание импульсного электрического тока выступают в роли активирующего возбуждения, интенсифицирующего двойникование [5-6].

На рис.2 представлены экспериментальные зависимости  $\rho$  от логарифма времени воздействия сосредоточенной нагрузки  $\ln t$  и постоянного МП. Сравнивая рис.1 и рис.2, можно видеть, что длительное воздействие сосредоточенной нагрузки повышает  $\rho$ . Из рис.2 видно, что постоянное МП стимулирует этот процесс. Нами экспериментально получено, что непосредственной причиной наблюдаемого эффекта является снижение средней длины пробега двойникующих дислокаций  $\lambda = \sum L_i / 2n$ , где  $L_i$  - длина  $i$ -го двойника.

Двойникование и скольжение в металлических кристаллах взаимно обуславливают друг друга [7]. Двойникование является энергоемким процессом. Но поскольку скорость этого процесса велика (сотни метров в секунду), то двойники быстро уносят упругую энергию от концентраторов напряжений. По мере развития скольжения, т.е. при длительном времени действия сосредоточенной нагрузки, энергия, запасенная в двойниках, расходуется для продолжения скольжения. Магнитное поле, по-видимому, стимулирует этот процесс. Силовое влияние постоянного МП на дислокации отсутствует в силу однородности первого. В [8] предполагается, что при приложении постоянного МП к металлу имеет место взаимодействие ядер полных дислокаций, имеющих магнитную упорядоченность, с атомами примеси, обладающих локализованными магнитными моментами. В результате спин-зависимых переходов в системе примесь-ядро дислокации постоянное МП разрушает локальные барьеры для полных дислокаций, образующих дислокационную розетку. Для двойникующих дислокаций системы этот канал влияния постоянного МП не реализуется. В ядрах частичных двойникующих дислокаций неспаренные спины отсутствуют, поскольку здесь нет оборванных межатомных связей. Таким образом, приложение постоянного МП повышает пробег полных дислокаций и, как следствие, интенсифицирует процесс использования упругой энергии, запасенной в двойниках, для развития скольжения.

Последнее предположение подтверждается полученными нами результатами, которые показали, что размеры дислокационных розеток, состоящих из рядов полных дислокаций, заметно больше в случае приложения постоянного МП к кристаллам висмута. Разумеется, данное явление нуждается в дальнейших экспериментальных и теоретических исследовани-

ях.

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

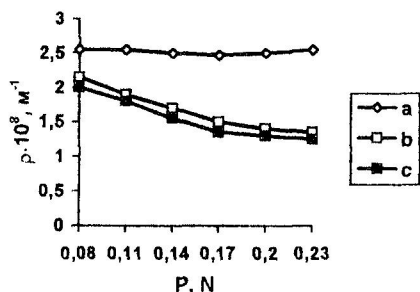


Рис. 1. Зависимость средней линейной плотности двойникоующих дислокаций ( $\rho$ ) от веса ( $P$ ) груза на штоке индентора: а - нет заряда на плоскости (111), б - положительный заряд на плоскости спайности (111), с - отрицательный заряд на плоскости (111)

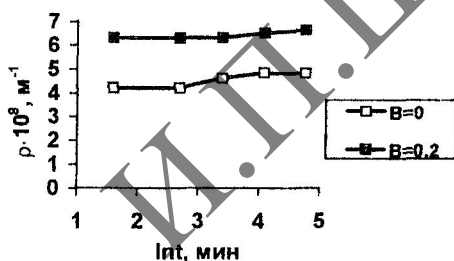


Рис. 2. Зависимость средней линейной плотности двойникоующих дислокаций ( $\rho$ ) от логарифма времени воздействия сосредоточенной нагрузки ( $lnt$ ) и постоянного магнитного поля

### Литература

1. Головин Ю.И. Механические свойства и поведение реальных металлов в сильных электрических и магнитных полях // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. -1993. -№8. -С.67-71.
2. Рошупкин А.М., Батаронов И.Л. Физические основы электропластической деформации металлов // Изв. вузов. Сер. Физика. -1996. - №3. - С.57-65.
3. Лихтман В.И., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. -М.: АН СССР, 1962. - 304с.
4. A.I. Pinchook, V.S. Savenko Electroplastic effect under simultaneous superposition of electric and magnetic fields // J. Appl. Phys. - 1999. - V. 86, №5. - Pp.2479-2482.
5. Пинчук А.И., Савенко В.С., Шаврей С.Д. Пластификация монокристаллов висмута при одновременном наложении электрического и магнитного поля // Изв. РАН. Сер. Физика. -1997. - Т.61, №5. - С.932-936.
6. Savenko, A.I. Pinchuk, V.B. Zlotnik, S.D. Shavrey. Plastification of Bismuth Crystals under Simultaneous Superposition of Electric and Magnetic Fields // Zeitschrift fur Metallkunder. - 1998. - №7. - P.498-500.
7. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Новый вид взаимодействия скольжения и двойникова-

ния // ДАН СССР. - 1981. - Т.259, №3. - С.582-583.

8. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Магнитоупругий эффект в монокристаллах алюминия // ФТТ. - 1992. - Т.34, №1. - С.155-158.

**Summary**

*The linear density of the twinning dislocations in a case when electrical current pulses and magnetic field were applied to bismuth crystals has been investigated.*

МДШУ ІМ. І.П.ШАМЯКІНА