

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАЗВИТИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДВОЙНИКОВАНИЕМ

¹Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, Россия

Мозырский государственный педагогический университет

Мозырь, Беларусь

Неустойчивость кристаллической решетки на границах раздела двойников в кристаллах, находящихся под нагрузкой, и высокая степень локализации напряжений в области двойниковых границ обуславливают повышенную чувствительность первичных двойников к изменению напряженного состояния кристалла. В [1, 2] было показано, что одним из эффективных способов воздействия на клиновидные двойники является пропускание через кристалл кратковременного импульса тока большой плотности при одновременном действии сосредоточенной статической нагрузки.

Выявление механизмов стимулирования пластической деформации двойникованием импульсами тока большой плотности имеет принципиальное значение. Правильные физические представления о протекающих в деформируемой кристаллической решетке процессах позволят осуществлять целенаправленный поиск возможностей изменения свойств двойниковых границ с целью повышения пластичности материала в условиях одновременного действия на кристалл нескольких факторов.

В процессе изучения кинетики развития двойникования под действием кратковременных импульсов тока исследованы около 10000 остаточных клиновидных двойников в монокристаллах висмута и сурьмы. Переменными параметрами в различных сериях экспериментов были плотность тока в импульсе и время выдержки кристалла под нагрузкой между повторным опусканием индентора и подачей электрического напряжения на образец. С целью выяснения физической природы стимулирования пластической деформации импульсами тока при индентировании кристаллов, прежде всего, изучено влияние направления импульсов тока в плоскости (111) монокристаллов Bi и Sb на дополнительное развитие двойникования. Всесторонний анализ статистических количественных данных о размерах двойников, полученных в идентичных условиях, показал, что импульсы электрического тока при одновременном действии статической нагрузки на индентор не позволяют выделить ни одну из трех кристаллографически равноценных пар плоскостей и направлений двойникования в кристаллах с ромбоэдрической решеткой, к которым принадлежат монокристаллы висмута и сурьмы, для преимущественного протекания какого-либо из элементарных процессов развития меха-

нического двойникования — генерирования двойникующих дислокаций на готовых границах раздела, продвижения двойникующих дислокаций в направлении двойникования или зарождения новых двойников [3]. Не обнаружен и разностный эффект в развитии двойников при изменении полярности прикладываемого к кристаллу кратковременного электрического напряжения. Все это не дает основания говорить об увлечении двойникующих дислокаций направленным потоком электронов.

Деформирование кристаллов сосредоточенной нагрузкой осуществлялось алмазной пирамидкой прибора ПМТ-3, на базе которого монтировалась экспериментальная установка, позволяющая пропускать через образец импульсы электрического тока при контролируемом времени выдержки под механическим напряжением. Импульс электрического тока длительностью $\sim 10^{-5}$ с возбуждался путем разрядки батареи конденсаторов. Параметры электрической цепи позволяли достигать плотности тока в импульсе до 1000 А/мм^2 .

После воздействия индентора на плоскости спайности кристалла остается отпечаток алмазной пирамидки с серией клиновидных двойников. Положение границ двойника можно с большей точностью определить металлографически. С помощью винтового окулярмикронметра прибора измерялись длина двойникового луча L и наибольшая толщина у устья h . Относительная погрешность измерений в зависимости от размеров составляла: для длины $0,2$ — 5% , для толщины 5 — 20% .

Изучение изменения размеров двойников проводилось по методике повторного индентирования: опускание индентора и выдержка кристалла под нагрузкой 5 секунд → измерение размеров двойников → повторное опускание индентора в ту же лунку → пропускание через нагруженный образец импульса тока → снятие нагрузки и повторное проведение замеров. Двойники, возникающие у отпечатка после первого опускания индентора, названы первичными; двойники, появившиеся после повторного опускания индентора с последующим воздействием — новыми.

Во всем диапазоне исследованных плотностей тока и времен выдержки кристаллов под нагрузкой — τ перед пропуском импульса с ростом эффективных напряжений в кристалле размеры двойников L и h изменяются неоднозначно: они могут увеличиваться, оставаться неизменными или уменьшаться (Табл. 1).

Полученные результаты можно объяснить, если предположить, что возбуждение в кристалле импульсов тока, так же как и облучение кристалла импульсами быстрых электронов [4, 5], сопровождается генерированием в нем волн сжимающих и растягивающих механических напряжений. Эти волны, достигая двойниковых вершин, в зависимости от фазы либо усиливают эффективные напряжения от сосредоточенной нагрузки, либо ослабляют их, возможно даже изменение знака напряжений в голове дислокационного скопления. В последнем случае имеет место сокращение длины двойника. Поскольку на границах коротких двойников обнаружена повышенная плотность двойникующих дислокаций, можно полагать, что ограничение их раз-

вития в длину связано не с малой мощностью источников двойнящихся дислокаций, а с наличием препятствий в области вершин. Если при данном уровне дополнительной нагрузки стопор не преодолен, то в полупериод действия растягивающих напряжений в области устья происходит генерирование новых дислокаций, которые частично успевают продвинуться по границам раздела к вершине и увеличить на границах двойника уровень ориентированных напряжений. В следующий полупериод суммарное действие ориентированных и изменившихся по знаку динамических напряжений приводит к заметному раздвойникованию.

Таблица 1. Влияние времени выдержки сдвойникового кристалла висмута под нагрузкой на изменение размеров первичных двойников при совместном действии статической нагрузки $P = 0,1$ Н и импульса электрического тока плотностью $j = 300$ А/мм².

$\frac{\Delta N_i}{N} \times 100, \%$									
τ, c	L ув. h ув.	L ум. h const.	L ув. h const.	L const. h ув.	L ум. h ув.	L ув. h ум.	L ум. h ум.	L const. h const.	исчез -ли
5	39,	11,9	17,6	5,9	11,9	—	1,2	8,9	2,9
30	36,3	20,4	12,4	1,4	10,4	3,0	3,5	7,5	4,5
60	32,1	21,6	12,6	0,5	9,6	2,1	4,4	7,9	9,8
300	34,1	24,7	10,0	2,4	6,5	2,4	6,5	3,5	10,6

Наблюдаемое явление сходно с локальным проявлением эффекта Баушингера на отдельных двойниках в результате взаимодействия ансамбля двойнящихся дислокаций с препятствиями, которое в данном случае заключается в сокращении длины или толщины двойников в результате действия периодического поля механических напряжений при наличии постоянной составляющей напряжений от сосредоточенной нагрузки.

Известно [6], что в процессе выдержки сдвойниковых кристаллов под нагрузкой в областях кристалла, примыкающих к двойниковым границам, протекает интенсивное скольжение, которое ведет к стабилизации двойниковой структуры. Анализ полученных данных показывает, что с увеличением времени выдержки кристаллов под нагрузкой растет степень обратимости деформации на границах первичных двойников в результате пропуска импульса, в частности, увеличивается количество полностью исчезающих двойников в кристаллах висмута (табл. 1) и сурьмы, при этом часть из них исчезает в результате релаксации напряжений в области устья за счет скольжения, протекающего при выдержке кристаллов под нагрузкой [7].

Увеличение времени действия сосредоточенной нагрузки перед подачей импульса тока сопровождается заметным уменьшением роста первичных двойников по сравнению с 5-секундной выдержкой. Сокращение роста первичных двойников в длину и увеличение обратимости деформации на их границах являются результатом формирования в кристалле барьеров, препятствующих движению дислокации в дислокационных ансамблях, образующих клиновидные двойники.

Интересно, что новые двойники с ростом времени выдержки кристаллов под нагрузкой развиваются интенсивнее: среднее число у отпечатка практически не изменяется (рис. 1), а доля коротких двойников уменьшается (рис. 2).

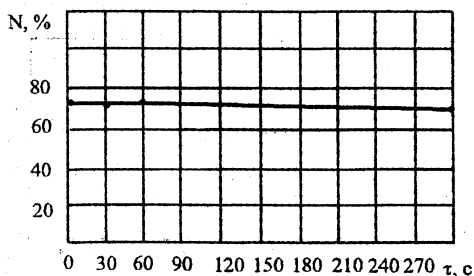


Рис. 1. Зарождение новых двойников после различного времени выдержки кристалла Вi под нагрузкой $P=0,1$ Н до пропускания импульса электрического тока плотностью $j=300$ А/мм².

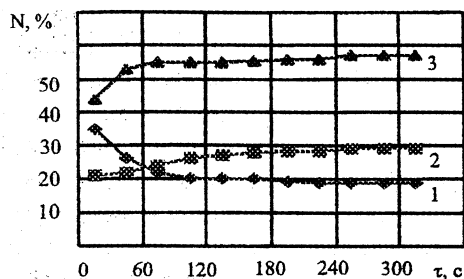


Рис. 2. Влияние времени выдержки кристалла Вi под нагрузкой $P=0,1$ Н до пропускания импульса тока плотностью $j=300$ А/мм² на зарождение новых двойников различной длины.

- 1 — $L=0$ — 24 мкм,
- 2 — $L=25-50$ мкм,
- 3 — $L=51-100$ мкм.

Подобный характер зарождения и развития новых двойников объясняется тем, что блокировка первичных двойников относительно дальнейшего их развития при прохождении импульса снижает демпфирующую способность материала в деформируемом объеме и большая часть упругой энергии расходуется на образование новых поверхностей раздела, движение по ним генерируемых источниками двойникоующих дислокаций. Предшествующее двойникованию скольжение, локализованное в окрестностях отпечатка, не затрудняет зарождение и развитие новых двойников при последующем импульсном нагружении.

Таким образом, как и в случае развития единичных двойниковых прослоек, предшествующее и сопровождающее двойникованию скольжение выполняет двойную роль;

с одной стороны, облегчает зарождение и развитие новых двойников; с другой стороны, тормозит дальнейшее развитие деформации на имеющихся в кристалле границах раздела.

Результаты по влиянию предварительной выдержки кристаллов под нагрузкой позволяют высказать некоторые соображения о формировании препятствий в области границ клиновидных двойников в результате сопутствующего скольжения. Усиление обратимости пластической деформации на границах первичных двойников при импульсном воздействии после длительного действия сосредоточенной нагрузки свидетельствует о том, что сопутствующее скольжение, протекая преимущественно за пределами сдвойникованных областей, создает препятствия для дальнейшего развития двойников. Барьеры в виде линий скольжения создаются в наиболее напряженных местах кристаллической решетки. Последующее импульсное воздействие приводит к отражению двойников от таких препятствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башмаков В.И., Савенко В.С. Изучение электромеханического эффекта при двойниковании кристаллов висмута в интервале температур 77–530 К // Изв. высших учебных заведений. Физика. — 1980. — № 7. — С. 29–33.
2. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Развитие поверхности раздела двойников в кристаллах сурьмы при действии статической нагрузки и импульсов электрического тока // Изв. высших учебных заведений. Физика. — 1990. — № 4. — С. 120–122.
3. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Кинетика образования клиновидных двойников в кристаллах висмута // Физ. металлов и металловедение. — 1981. — Т. 51, Вып. 5. — С. 1066–1072.
4. Беспалко А.А., Геринг Г.И. Акустическая дозиметрия интенсивности электронных пучков // ЖЭТФ. — 1980. — Т. 50, № 1. — С. 213–215.
5. Даринская Е.В., Урусовская А.А., Беспалко А.А., Геринг Г.И. Исследование динамики дислокаций при деформации кристаллов NaCl сверхкороткими импульсами облучения в электронном пучке // Физ. твердого тела. — 1982. — Т. 24, Вып. 3. — С. 940–941.
6. Косевич В.М., Башмаков В.И. Изучение отдыха двойникованных монокристаллов // Физ. металлов и металловедение. — 1961. — Т. 11, Вып. 1. — С. 100–107.
7. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Новый вид взаимодействия двойникования и скольжения // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 259, № 3. — С. 582–583.