

## ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ

Башмаков В. И., Чикова Т. С., Шавловская И. П., Бастун А. Ю.

Мозырский государственный педагогический университет

Мозырь, ул. Студенческая, 28, [mozvuz@mail.gomel.by](mailto:mozvuz@mail.gomel.by)

Слабая теоретическая проработка вопросов взаимодействия двойникования и скольжения связана с недостаточной изученностью процессов двойниковой перестройки на границах раздела деформационных двойников в металлах при различных режимах деформирования. Количественное исследование пластической деформации двойникованием в металлах затруднено из-за их непрозрачности и интенсивного скольжения, предшествующего и сопутствующего двойникованию. По этой причине для выявления закономерностей зарождения и роста двойников в металлах необходимы большие серии экспериментов в строго контролируемых условиях. В монокристаллах висмута, сурьмы и цинка клиновидные деформационные двойники легко вызываются действием сосредоточенной нагрузки, например, при вдавливании алмазной пирамидки в плоскость спайности образцов. При этом, как отмечалось в [1], появление преобладающей части двойников у отпечатка можно предсказать. Их зарождение инициируется концентраторами напряжений, которые связаны с геометрическими особенностями индентора. При таком способе деформирования механические двойники занимают ограниченный объем у концентраторов напряжений и никогда не захватывают все сечение кристалла. Выявлена стадийность в развитии остаточных клиновидных двойников с ростом нагрузки. Показано, что на отдельных участках границ раздела двойников, для которых значение параметра  $h/L$  ( $L$  – длина двойникового клина,  $h$  – максимальная толщина) достигает величины  $\sim 10^{-2} - 10^{-1}$ , могут протекать разные по знаку процессы перестройки кристаллической решетки – двойникование и раздвойникование [2].

В данной работе изучались тонкие клиновидные двойниковые прослойки с параметром  $h/L \sim 10^{-3}$ . Такие двойники появляются у отпечатков алмазной пирамидки с диагоналями от 2 до 15 мкм. Для их получения использовались погружения алмазного индентора в кристалл на глубину от нескольких десятых долей микрона до двух микрон, то есть минимально возможные нагрузки, при которых на плоскости спайности остается отпечаток пирамидки. Все двойники у таких отпечатков имеют прямолинейные границы и клиновидную форму с постепенно уменьшающейся от устья к вершине толщиной. Поскольку для перестройки моноатомного слоя решетки достаточно одной двойнивающей дислокации, клиновидный двойник представляет собой совокупность кристаллографических плоскостей, в которых начато, но не окончено двойникование. Каждая из плоскостей, частично охваченная двойникованием, ограничена от несдвойникованной части кристалла линией двойнивающей дислокации.

Следует отметить, что у отпечатков минимальных размеров остаточные деформационные двойники возникают не всегда, иногда появляются отпечатки без двойниковых лучей. Бесспорным является тот факт, что двойники зарождаются в наиболее деформированных скольжением областях кристалла. В случае индентирования образцов алмазной пирамидкой это, как правило, одни и те же области отпечатков, сделанных при идентичных условиях. Максимальная толщина двойников всегда наблюдается на сторонах или вершинах отпечатка, что свидетельствует о стимулирующей роли предшествующего двойникованию скольжения в зарождении деформационных двойников. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 1, подтверждают это положение.

Практически во всех работах, посвященных изучению механического двойникования, конкретная информация об источниках двойникующих дислокаций отсутствует. Теоретически рассматривались полюсные механизмы размножения двойникующих дислокаций [3], однако в экспериментах такие механизмы не обнаружены. Реализованная в предлагаемой работе методика исследования позволяет получить некоторые данные об источниках двойникующих дислокаций, возбуждаемых набором концентраторов напряжений, связанных с пирамидкой. В частности, измерение максимальной толщины двойника, возникающего у одного и того же стабильного концентратора напряжений, позволяет получить сведения о количестве двойникующих дислокаций, генерируемых источником. О размерах зоны, в которой работает дислокационный источник, можно судить по вовлечению в двойникование новых слоев кристаллической решетки в процессе увеличения размеров отпечатка и поглощения части двойника в области, где генерируются двойникующие дислокации.

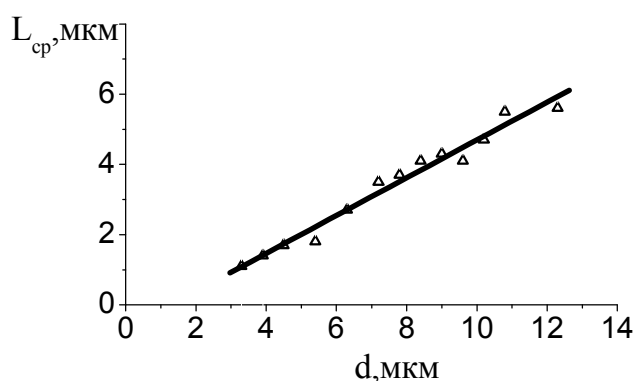


Рис.1. Зависимость средней длины клиновидной двойниковой прослойки от величины диагонали отпечатка

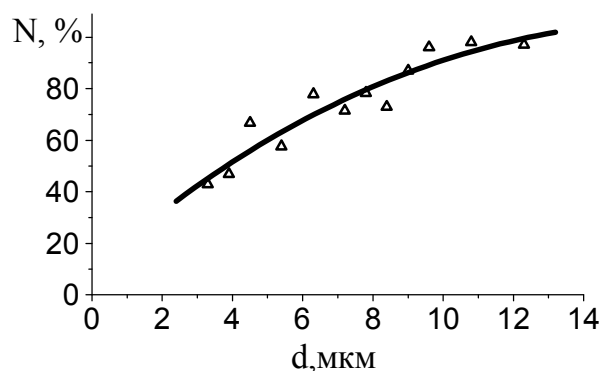


Рис.2. Зависимость вероятности возникновения клиновидного двойника у стабильного концентратора напряжений, задаваемого индентором, от величины диагонали отпечатка

Изучение формы деформационных двойников в объеме деформированного кристалла показало, что источники двойникующих дислокаций возбуждаются только в поверхностных слоях. Об этом свидетельствует монотонное уменьшение толщины двойника по мере послойного стравливания сдвойникового образца. Для оценки размеров области, в которой генерируются двойникующие дислокации, обеспечивающие развитие конкретного двойника, проводились специальные эксперименты по индентированию монокристаллов висмута и цинка со ступенчатым увеличением нагрузки. Оказалось, что источник двойникующих дислокаций может охватывать зону в десятки квадратных микрон и поглощение увеличивающимся отпечатком тела двойника заметно не сказывается на активности источника двойникующих дислокаций.

Работа источников двойникующих дислокаций изучалась на нескольких тысячах двойников. Примерно в одной трети случаев источники двойникующих дислокаций срабатывали только на стадии зарождения двойников. При последующем увеличении нагрузки такие двойники постепенно поглощались растущим отпечатком. Характерными особенностями заклинившихся двойников являются малая длина  $L$  и значение параметра  $h/L > 10^{-2}$ . Это дает основание полагать, что активность источника двойникующих дислокаций может подавляться напряжениями от скоплений двойникующих дислокаций на границах.

Путем постепенного увеличения глубины погружения индентора в сериях однотипных экспериментов легко выясняется последовательность зарождения деформационных двойников у отпечатков. Двойникование начинается с зарождения двух-трех изолированных двойников на разных сторонах отпечатка. В процессе дальнейшего вдавливания алмазной пирамидки в плоскость спайности монокристалла у каждого из первичных двойников развивается очаг двойникования, состоящий из нескольких близкорасположенных двойников. Реакция двойников, входящих в группы, на дополнительное силовое воздействие более сложное, чем для изолированных прослоек. В условиях повышения внешней нагрузки для отдельных двойников наблюдалась обратимость в работе источников двойникующих дислокаций, вплоть до полного исчезновения двойника. Часть двойников зарождается на случайных неоднородностях структуры. Количественные закономерности зарождения и роста таких двойников в данных экспериментах выявить не удалось.

Стабильные концентраторы напряжений обеспечивают воспроизводимость подавляющей части двойниковых прослоек. Увеличение вероятности зарождения деформационного двойника у стабильного концентратора напряжений, наличие которого обусловлено геометрическими особенностями алмазной пирамидки, с ростом диагонали отпечатка (рис.2) подтверждает гипотезу об иницировании зарождения деформационных двойников предшествующим двойникованию скольжением.

Линейная зависимость средней длины двойниковых лучей от размеров диагоналей отпечатков (рис.1) хорошо коррелирует с результатами количественного изучения роста упругих двойников при приложении к кристаллам кальцита концентрированной нагрузки, на основе которых создана дислокационная теория механического двойникования [4]. Полученные экспериментальные данные показывают, что в исследованном диапазоне нагрузок ансамбль двойникующих дислокаций, образующих границы раздела, ведет себя как единое целое. Движение группы лидирующих дислокаций в вершине двойника определяется дальнедействующими силами отталкивания между дислокациями одного знака на границах.

Изменения линейных размеров и формы двойниковой прослойки с ростом концентрированной нагрузки соответствуют критериям дислокационной теории [4]. Главным отличием поведения под нагрузкой тонких двойников в металлах и в кристаллах кальцита является большая сила трения, которая при уменьшении или полном снятии нагрузки препятствует обратному движению двойникующих дислокаций. Это свидетельствует о значительном различии величины силы сопротивления для движения двойникующих дислокаций в металлическом кристалле при двойниковании и раздвойниковании, о зависимости силы трения от скорости движения двойникующей дислокации. Двойникующие дислокации при зарождении двойников движутся со скоростями порядка сотен метров в секунду [5]. Рост силы трения при возвратном движении двойникующих дислокаций вероятнее всего связан с искажениями кристаллической решетки на границах раздела на стадии зарождения двойника, то есть, обусловлен скольжением, сопровождающим двойникование.

Список литературы

1. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Кристаллография **47**, 3, 537 (2002).
2. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Дуб Н. Н. Вестник Тамбовского государственного университета **8**, 4, 601 (2003).
3. Хирт Дж. Лоте И. Теория дислокаций. Атомиздат, М. (1972).
4. Косевич А. М., Бойко В. УФН **104**, 2, 201 (1971).
5. Финкель В. М., Федоров В. А., Королев А. П. Разрушение кристаллов при механическом двойниковании. Изд. Рост. университета, Ростов–на–Дону. (1990).