

УДК 669. 76:548. 24

Башмаков В. И., Чикова Т. С.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ДВОЙНИКОВ В ВИСМУТЕ

Механическое двойникование является таким же фундаментальным свойством кристаллических структур, как и скольжение [1]. Оно обусловлено анизотропией упругих характеристик кристаллической решетки [2] и обнаружено во всех кристаллографических системах [3]. Стимулированию пластической деформации двойникованием способствуют ударные нагрузки, низкие температуры и другие экстремальные условия эксплуатации широко используемых в технике двойнящихся материалов. В связи с этим разработка физических основ зарожде-



ния и развития механического двойникования реальных кристаллов является одной из актуальнейших проблем современной физики твердого тела.

В наиболее чистом виде процесс зарождения и развития пластической деформации двойникованием протекает в совершенных ионных кристаллах. Проводя эксперименты с прозрачными кристаллами кальцита и натронной селитры, где появление и рост механических двойников можно наблюдать непосредственно, Гарбер сделал ряд основополагающих выводов, которые на долгие годы предопределили методологию экспериментального и теоретического исследования этого явления. Во-первых, он показал, что для получения устойчивого клиновидного двойника в кристалле необходимо наличие сосредоточенной нагрузки [4]. Это положение впоследствии нашло свое теоретическое обоснование в дислокационной теории упругого двойникования [5]. Во-вторых, Гарбер доказал наличие стадийности в процессе образования и роста механического двойника [6]. Пластическая деформация двойникованием всегда начинается с зарождения в кристалле клиновидной прослойки. При увеличении внешней нагрузки рост длины L и толщины h двойника происходит плавно, синхронно и пропорционально таким образом, что в течение всего процесса роста в кристалле он сохраняет форму тонкого клина. А это значит, что размеры клиновидной двойниковой прослойки однозначно определяются величиной внешней нагрузки P . Отношение толщины прослойки h к её длине L , то есть параметр h/L , является постоянной величиной для двойника и не зависит от нагрузки [4].

Этот надежно установленный опытный факт положен в основу дислокационной теории [5], описывающей пластичность кристалла, деформируемого чистым двойникованием.

Как показали исследования, механическое двойникование в металлах проходит в своем развитии те же этапы, что и в ионных кристаллах [1], однако характер протекающих при этом процессов имеет существенные отличия [7]. Это связано прежде всего с наличием в металлах предшествующего и сопутствующего скольжения. Кроме того, при определенных условиях рост двойников сопровождается развитием трещин. Двойникование, скольжение и разрушение при одновременном протекании интенсивно взаимодействуют друг с другом, предопределяя сложность микропроцессов на границах раздела кристаллических структур и многообразие факторов, контролирующей пластическую деформацию.

Кинетику развития пластической деформации в металлах, в отличие от прозрачных ионных кристаллов, невозможно наблюдать непосредственно. Из-за отсутствия надежных и общепринятых методик количественного изучения двойникования в металлах, в частности, единых количественных характеристик двойниковых прослоек, опытные данные различных авторов, как правило, не совпадают, а зачастую и противоречат друг другу.

При планировании эксперимента по изучению пластической деформации двойникованием в металле в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения исследуемый материал, способ его деформирования и измеряемые параметры выбирались таким образом, чтобы можно было проводить объективный сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными и теоретическими данными по изучению чистого двойникования.

Висмут так же, как и кальцит, принадлежит к тригональной кристаллической системе. В широком диапазоне температур двойникование в нем сопровождается скольжением [8].

Деформирование висмута осуществлялось с помощью алмазного индентора прибора ПМТ-3, имеющего форму пирамидки, который создавал в кристалле неоднородное, быстро спадающее в глубь образца поле упругих напряжений. На плоскости спайности (111) монокристалльного образца ставился отпечаток пирамидки, вокруг которого появлялось сразу несколько клиновидных двойниковых прослоек. После разгрузки кристалла с помощью микроскопа с большой точностью измерялись длина двойникового клина L и его толщина у устья h .

Как правило, для количественного описания закономерностей развития клиновидных двойников использовались размеры наибольшей прослойки, появившейся у концентратора напряжений — L_{\max} и h_{\max} , усредненные по результатам 10–20 измерений [9]. Однако, как показали предварительные оценки данного исследования, максимальные размеры клиновидных двойников в монокристаллах висмута даже в условиях наиболее щадящего режима деформирования, а именно: при комнатной температуре, небольших статических нагрузках и отсутствии каких-либо дополнительных воздействий, — в одной серии измерений отличаются в несколько раз, иногда на порядок. Очевидно, что усредненное значение величин, отличающихся столь значительным разбросом, даже при большом числе измерений не является воспроизводимым количественным параметром и не может служить объективной характеристикой изучаемого явления.

Для разработки оптимальной методики количественного изучения механического двойникования металлов, протекающего в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения, проведено исследование ста отпечатков алмазного индентора на плоскости спайности (111) мо-

нокристалла висмута с общим с числом образовавшихся вокруг них клиновидных двойников $N = 993$. Все измерения проводились при комнатной температуре, нагрузке $P = 0,1Н$ и строгом соблюдении идентичности условий эксперимента с точки зрения взаимной ориентации внешнего деформирующего усилия и действующих плоскостей двойникования в кристалле.

На рис. 1 и рис. 2 приведены гистограммы, иллюстрирующие разброс максимальных размеров двойников.

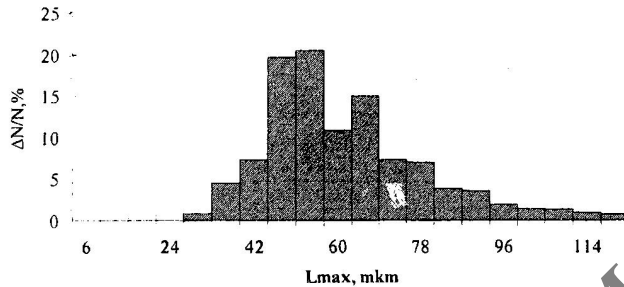


Рис. 1. Распределение по длинам клиновидных двойников с L_{max} .

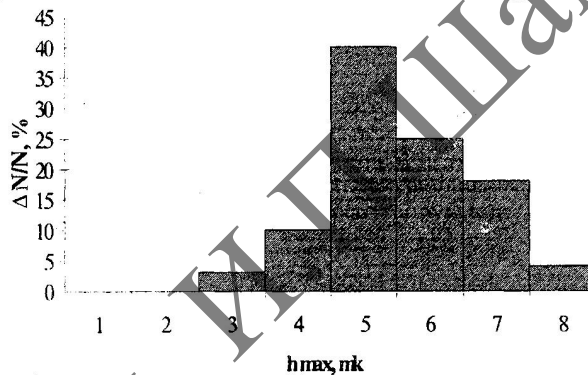


Рис. 2. Распределение по толщинам клиновидных двойников с h_{max} .

Видно, что даже для двойников с максимальными размерами, получивших наибольшее развитие у каждого отпечатка при заданном усилии, отсутствует однозначное соответствие между величиной нагрузки и параметрами двойника, как это имело место при чистом двойниковании.

Разброс значений L_{max} и h_{max} становится понятным, если учесть реальную структуру исходного кристалла, а также предшествующее и сопутствующее скольжение, которое в процессе своего развития насыщает кристалл в зоне деформации различными дефектами. Несовершенства структуры являются стопорами для развивающихся двойников. Сталкиваясь с препятствиями типа дислокаций, принадлежащих другим системам скольжения, границ блоков, ступеней скола, включений и др., двойниковая прослойка прекращает рост. Стопорение клина может происходить не только в вершине, но и по его границам у устья. В результате двойник не получает своего максимального развития, соответствующего уровню внешних механических напряжений как по длине, так и по толщине. В металлическом кристалле величина нагрузки перестает быть единственным фактором, определяющим процесс пластической деформации. Рост механических двойников в значительной мере контролируется дефектной структурой материала. Структурная чувствительность размеров клиновидных двойников обеспечивает наблюдаемый разброс измеряемых параметров, а также их количественную невоспроизводимость в аналогичных экспериментах.

Совершенно очевидно, что развитие механического двойника в реальном кристалле определяется случайными факторами и имеет вероятностную природу, так же, как и ряд других процессов, в основе которых лежит зарождение, размножение и движение дислокаций: пробег полных дислокаций в линиях скольжения, рост трещин и др. [5]. Известно, что объективное количественное изучение подобных физических явлений возможно только с применением методов теории вероятности и математической статистики.

Для изучения влияния использованной сосредоточенной нагрузки на зарождение и характер развития клиновидных двойников у концентратора напряжений исследована связь геометри-

ческих особенностей алмазной пирамидки с вероятностью появления двойников у отдельных ее граней, а также проведен статистический анализ размеров всех двойников у ста отпечатков.

Оказалось, что в идентичных экспериментах геометрия расположения ансамбля клиновидных двойников вокруг отпечатка индентора заметно повторяется. Большинство двойников (73%) появляются в одних и тех же местах граней пирамидки. Часть двойников (27%) зародились на случайных неоднородностях кристалла, места их возникновения заранее невозможно было предсказать. Таким образом, структурные особенности алмазной пирамидки выполняют роль набора стабильных концентраторов напряжений, инициирующих зарождение деформации двойникованием.

В табл. 1 приведены данные о стабильных концентраторах напряжений на гранях пирамидки, действующих при нагрузке $P = 0,1\text{Н}$, где указана вероятность зарождения двойника у каждого концентратора W , а также вероятностные значения L_{max} и h_{max} для них.

Таблица 1

Распределение стабильных двойников у отпечатков алмазного индентора

Номер концентратора	1	2	3	4	5	6	7
$W, \%$	76	100	100	95	99	100	83
$L_{\text{max}}, \text{мкм}$	65,5	78,0	79,1	54,0	65,0	83,4	64,5
$h_{\text{max}}, \text{мкм}$	7,5	5,5	4,6	6,0	6,2	4,1	5,0

Предполагалось, что можно ввести понятие мощности стабильного концентратора, которая характеризовалась бы параметрами W , L_{max} и h_{max} . Следовало ожидать, что у концентратора с $W = 100\%$ должны возникать двойники с наибольшими размерами. Однако однозначного соответствия между размерами двойника и вероятностью его зарождения, как видно из табл. 1, не обнаружено. На этом основании сделан вывод о том, что мощность каждого стабильного концентратора, задаваемого конструкцией индентора, в каждом отдельном случае корректируется локальной дефектной структурой кристалла в зоне деформации, ослабляя или усиливая его.

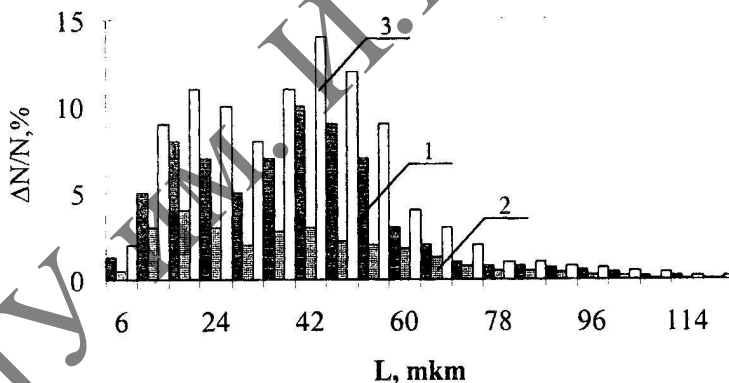


Рис. 3. Распределения двойников по длинам для различных концентраторов: 1 — стабильные двойники, 2 — нестабильные двойники, 3 — суммарная гистограмма.

Поскольку основными количественными параметрами клиновидных двойников при изучении чистого двойникования и создании его дислокационной модели являлись длина клина L , отношение толщины прослойки к ее длине h/L и их взаимосвязь с величиной действующей нагрузки P , представляет интерес изучение этих же зависимостей и для механического двойникования металлов. Учитывая выявленную статистическую природу процесса двойникования в висмуте, для изучения влияния ориентационных и структурных особенностей используемого индентора в виде алмазной пирамидки на характер роста двойников у отпечатка проводился статистический анализ распределения двойников по указанным параметрам.

С этой целью строились статистические распределения двойников по длинам и по параметру h/L (рис. 3, рис. 4) для групп двойников, зародившихся на концентраторах различной природы: стабильные двойники, инициируемые совокупностью концентраторов напряжений, задаваемых конструкцией индентора; нестабильные двойники, вызванные действием локальных полей внут-

ренних напряжений, создаваемых дефектами структуры кристалла, а также суммарные гистограммы, полученные по результатам всех измерений в серии однотипных экспериментов.

Как видно из рис. 3, закон распределения всех групп двойников по длинам $\frac{\Delta N}{N}(L)$ имеет полимодальный вид и одинаков для концентраторов различной природы.

Для параметра h/L в отличие от закономерностей чистого двойникования и положений дислокационной теории не только не наблюдается однозначного соответствия с величиной внешней нагрузки, но, как свидетельствуют гистограммы $\frac{\Delta N}{N}(h/L)$ на рис. 4, имеет место статистический разброс данных, описываемый законом, близким к нормальному распределению с различной степенью асимметрии. Так же, как и в случае распределения двойников по длинам, вид статистических графиков $\frac{\Delta N}{N}(h/L)$ не зависит от природы действующих концентраторов напряжений.

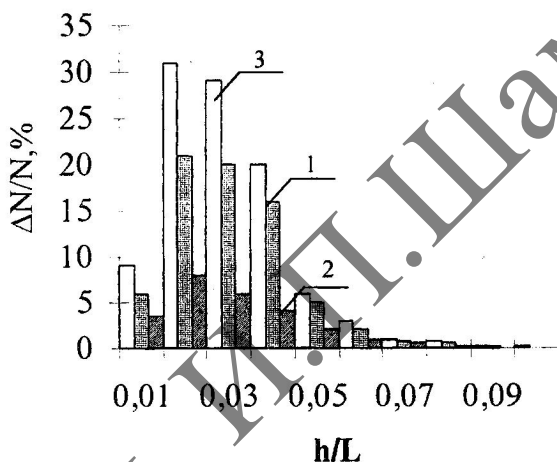


Рис. 4. Распределения двойников по параметру h/L для различных концентраторов: 1 — стабильные двойники, 2 — нестабильные двойники, 3 — суммарная гистограмма.

Аналогичные исследования были проведены с использованием индентора в виде шарика. Замена алмазной пирамидки на стальной шарик приводит к заметному сокращению числа двойников у отпечатка, однако общие закономерности развития двойников при этом не изменяются.

Таким образом, в металлическом кристалле в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения размеры клиновидных двойников не являются однозначной функцией величины внешней нагрузки, как при чистом двойниковании в ионных кристаллах. Кроме уровня механических напряжений, определяющую роль в зарождении и развитии двойниковой прослойки играет дефектная структура реального кристалла, которая обеспечивает вероятностную природу развития процесса пластической деформации двойникованием в металле и требует статистического подхода к проведению экспериментальных исследований и анализу полученных данных.

Двойники, возникающие у концентраторов напряжений, создаваемых индентором, и у дефектов внутренней структуры кристалла, описываются одинаковыми статистическими законами. Это обстоятельство позволяет делать выводы о наиболее общих закономерностях развития механического двойникования в металле на основании анализа всей совокупности экспериментальных данных без учета физической природы концентраторов напряжений, у которых зарождается и протекает процесс.

Литература

1. Классен-Неклюдова М. В. Механическое двойникование кристаллов. М., 1960.
2. Степанов А. В. // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. № 8. С. 713 -723
3. Cahn R. W. // Acta. Met. 1953a. Vol. 1. P. 49 — 70.



4. Гарбер Р. И. // Докл. АН СССР. 1938. Т. 21. № 5. С. 233 — 235.
5. Косевич А. М., Бойко В. С. // УФН. 1971. Т. 104. вып. 2. С. 201 — 254.
6. Гарбер Р. И. // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. вып. 3. С. 354 — 357.
7. Башмаков В. И., Чикова Т. С. // ФММ. 1981. Т. 51. вып. 5. С. 1066 — 1072.
8. Косевич В. М., Башмаков В. И. // Кристаллография. 1959. Т. 4. вып. 5. С. 749 — 755.
9. Косевич В. М., Башмаков В. И. // ФММ. 1960. Т. 9. вып. 2. С. 288 — 293.

Summary

Effect of the types of stress concentrators on the probability of occurrence and sizes of mechanical twins in bismuth single crystals is investigated experimentally. It has been obtained that in metal crystal length and thickness of wedge-shaped twin under the indentation load are changing a random way. Interaction of glide and twinning leads to the state when the value of external force ceases to be the factor that defines uniquely twin sizes.

МГПУ ИМ. И.П.ШОПЯКІНА