

РАЗДВОЙНИКОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА, ВЫЗВАННОЕ СКОЛЬЖЕНИЕМ

В. И. Башмаков, Т. С. Чикова

*Мозырский государственный педагогический институт
247760, Беларусь, Мозырь Гомельской обл., ул. Студенческая, 28
e-mail: mozinst@mail.ru*

Обратимость пластической деформации является одним из основных свойств механического двойникования кристаллов. На упругой стадии чистого двойникования перестройка кристаллической решетки из двойникового состояния в исходное состояние происходит за счет внутренних напряжений дислокационной природы. При наличии скольжения раздвойникование может быть получено действием напряжений обратного знака.

Обнаружен новый вид раздвойникования на границах остаточных двойниковых прослоек под действием возрастающих внешних механических напряжений. Взаимодействие между скольжением и двойникованием приводит к тому, что величина внешней силы перестает быть фактором, однозначно определяющим размеры двойников. При увеличении нагрузки у концентратора напряжений могут одновременно протекать процессы двойникования и раздвойникования.

Обратимость пластической деформации является важной особенностью механического двойникования кристаллов [1]. Р.И. Гарбер установил, что с увеличением внешней нагрузки процесс деформации двойникованием протекает непрерывно и при этом его можно разделить на ряд последовательных стадий. Наиболее важной и интересной является стадия упругого двойникования, состоящая в возникновении под сосредоточенной нагрузкой клиновидной двойниковой прослойки, а затем в уменьшении ее размеров при понижении внешних механических напряжений и полном исчезновении в результате разгрузки кристалла. Таким образом, Р.И. Гарбером впервые было обнаружено явление самопроизвольной обратимости пластической деформации [2].

Для описания упругого двойникования разработана количественная дислокационная теория тонких двойников [3]. В основу теоретической модели положены экспериментальные данные по исследованию изменения формы и размеров механических двойниковых прослоек в прозрачных ионных кристаллах кальцита и натриевой селитры, в которых при комнатных температурах и обычных нагрузках скольжение не происходит и процесс механического двойникования можно наблюдать непосредственно в наиболее чистом виде [4].

В материалах, деформируемых только путем двойникования, перестройка кристаллической решетки из двойникового состояния в исходное происходит за счет внутренних напряжений дислокационного происхождения [3].

Механическое двойникование в металлах проходит в своем развитии те же этапы, что и в ионных кристаллах [5], однако характер протекающих при этом процессов существенно отличен [6]. Это обусловлено, прежде всего, наличием в металлах предшест-

вующего 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 двойников и многообразие факторов, контролирующих пластическую деформацию.

Выход механической двойниковой прослойки из металлического кристалла можно осуществить с помощью напряжений обратного знака. Это явление хорошо изучено [6].

Выявлено исчезновение заклинившихся механических двойников при отжиге [7] и при длительной выдержке сдвойникового кристалла под нагрузкой [8] в процессе установления термодинамического равновесия.

В данной работе установлен новый вид раздвойникования на границах остаточных двойниковых прослоек в металле при увеличении знакопостоянных внешних механических напряжений.

Экспериментально обнаружено [2] и теоретически обосновано [3], что механический двойник конечных размеров можно вызвать, воздействуя на кристалл нагрузкой, сконцентрированной в малой области поверхности образца. Для получения двойниковых прослоек клиновидной формы осуществлялся традиционный способ деформирования кристаллов сосредоточенной нагрузкой [5]. В качестве деформирующего устройства использовалась алмазная пирамидка металлографического микроскопа ПМТ-3, создающая сильно неоднородное радиально спадающее в глубь образца поле механических напряжений.

Исследования проводились на монокристаллах висмута, которые обладают рядом свойств, сделавших этот материал привлекательным для широкого использования в экспериментах по изучению механического двойникования металлов. В висмуте одновременно реализуются оба вида пластической деформации – двойникование и скольжение. При комнатной температуре в Вi скольжение по плоскостям базиса $\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ предшествует двойникованию и на всех этапах сопровождает его [6]. Легко выращивать монокристаллы Вi и получать образцы с заданной ориентацией кристаллографических плоскостей. Вследствие наличия совершенной плоскости спайности рабочие поверхности кристаллов не требуют дополнительной обработки [9].

При воздействии на плоскость (111) монокристалла висмута у концентратора напряжений – алмазного индентора – зарождается серия клиновидных двойников по системам $\{110\}\langle 001\rangle$ (рис. 1).

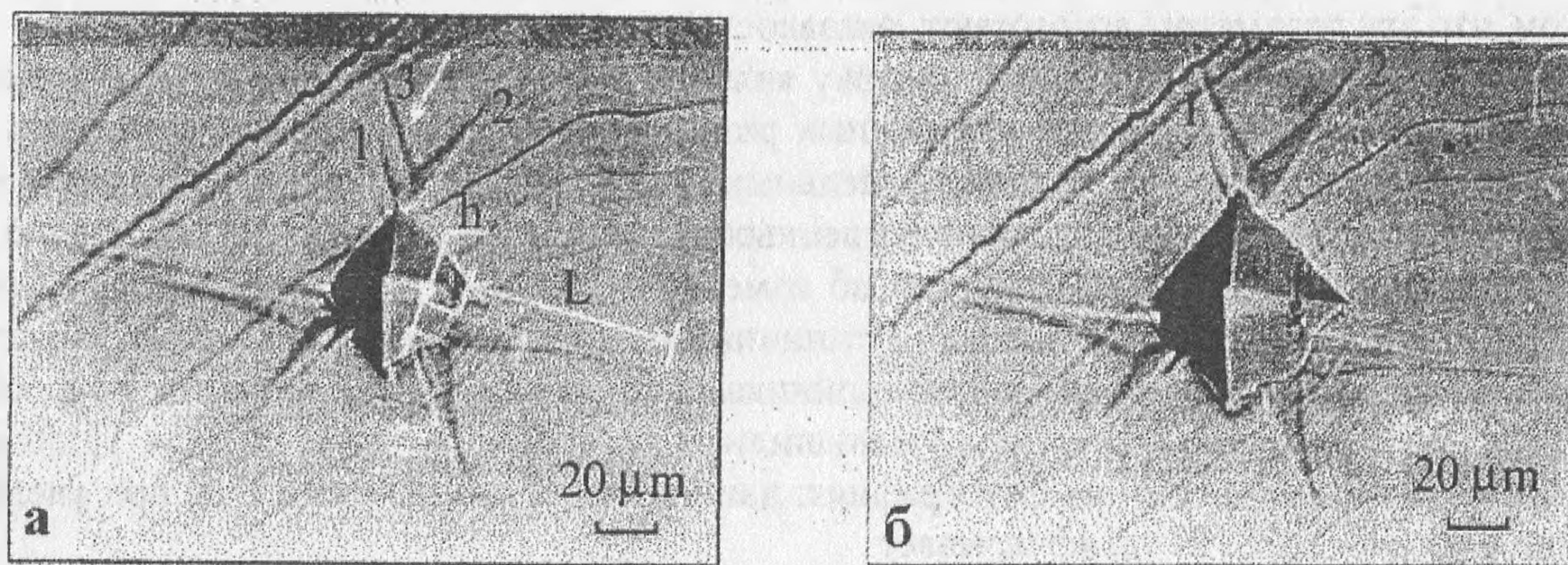


Рис. 1. Микрофотография отпечатка индентора с серией клиновидных двойников на плоскости (111) монокристалла висмута.

а – $P = 0,02$ Н, б – $P = 0,03$ Н.

Изучено изменение размеров двойниковых прослоек у отпечатка пирамидки при увеличении действующей статической нагрузки на кристалл от 0,1 Н до 0,5 Н. Первоначальное нагружение образца, при котором активизировались источники двойникоующих дислокаций и зарождались двойниковые лучи, осуществлялось при нагрузке на индентор $P = 0,05$ Н.

Благодаря применению разработанной нами методики повторного индентирования удалось проследить последовательный характер изменения размеров клиновидных двойников у 378 отпечатков с ростом внешней нагрузки в указанном диапазоне. Суть методики измерений состоит в промежуточной разгрузке образца, замеров длины L и толщины у устья h каждого из полученных двойников у отпечатка, увеличении действующих статических напряжений и повторном внедрении индентора в ту же лунку. После очередной разгрузки и проведения измерений вновь меняется нагрузка, и деформирование образца продолжается. На промежуточных стадиях проводилось также фотографирование деформационной картины у концентратора.

Подобный эксперимент требует тщательной подготовки и точности в проведении, однако полученные результаты оправдывают большую трудоемкость работ, проводимых по такой схеме. Из-за непрозрачности кристаллов кинетику процесса двойникования в металлах нельзя наблюдать непосредственно. Экспериментаторы, как правило, судят о закономерностях этого явления по конечным результатам воздействия, при этом важные особенности структурной перестройки кристалла под нагрузкой остаются скрытыми от глаз наблюдателя.

Специальными исследованиями было убедительно показано, что повторное опускание индентора в ту же лунку без длительной выдержки с двойникованных кристаллов под нагрузкой не приводит к металлографически определяемому изменению конфигурации границ, числа и размеров двойников у отпечатка алмазной пирамидки.

При чистом двойниковании ионных кристаллов размеры клиновидного двойника — длина L и толщина h — однозначно определяются величиной внешней нагрузки P . Они плавно увеличиваются при повышении механических напряжений в кристалле. Рост длины и толщины двойникового клина происходит синхронно и пропорционально таким образом, что прослойка в течение всего процесса роста в кристалле сохраняет форму равностороннего клина.

Как показали исследования, в висмуте не существует прямой корреляции между величиной внешней статической нагрузки и размерами двойниковых клиньев. При увеличении действующих механических напряжений изменяется количество двойников у отпечатка и их размеры. Вопреки ожиданиям и утверждениям некоторых авторов о том, что эти параметры возрастают, оказалось, что они изменяются неоднозначно.

Полную адекватную характеристику явления можно сделать только на основании изучения всей совокупности полученных результатов с двух взаимодополняющих позиций: анализ эволюции размеров отдельных двойниковых образований под нагрузкой и статистическое обобщение количественных данных серии однотипных измерений.

В таблице приведены сведения об изменении длины L и толщины h каждого из клиновидных двойников у одного из типичных отпечатков индентора с ростом нагрузки. Видно, что наряду с растущими двойниками «2», «3», «8», «9», имеются прослойки, такие как «7», размеры которых уменьшились, двойник «6» исчез совсем. Подобную картину можно видеть и на фотографиях: двойниковый луч «3» (рис. 1, а) при увеличении нагрузки до 0,3 Н также исчезает.

Для получения объективной информации в ходе промежуточных измерений учитывался фактор частичного поглощения увеличивающимся при повышении нагрузки отпечатком окружающих его двойников. С этой целью длины прослоек измерялись не от края отпечатка, как это было принято традиционно, а от центра алмазной пирамидки, который четко виден на отпечатке.

Т а б л и ц а

N	L, мкм / h, мкм			
	P=0,1H	P=0,2H	P=0,3H	P=0,5H
1	8,0/2,0	19,0/3,0	15,0/3,0	10,0/2,5
2	20,0/0,5	45,0/3,5	47,0/6,0	60,0/9,0
3	24,0/3,0	29,0/6,5	34,0/6,5	56,0/9,0
4	9,5/1,0	19,0/4,0	15,0/3,0	12,0/1,5
5	26,0/4,0	30,0/4,5	23,0/5,0	16,0/3,0
6	13,0/0,5	11,0/1,5	-	-
7	39,0/3,5	30,0/5,0	24,0/5,0	4,0/1,5
8	-	50,5/5,0	57,0/7,0	68,0/11,0
9	-	-	56,0/3,0	57,0/7,5

N – номер двойника у отпечатка.

Уменьшение размеров прослойки означает её выход из кристалла, то есть раздвоивание. Необычность ситуации в наших экспериментах состоит в том, что обратимость пластической деформации в нашем случае проявляется не в результате разгрузки кристалла или действия напряжений обратного знака, а при повышении внешних механических напряжений того же знака.

Количество исчезающих двойников и двойников, размеры которых с ростом нагрузки уменьшаются, достаточно велико. Они исследовались наиболее подробно.

Оказалось, что количество клиновидных прослоек, размеры которых сокращаются, и число исчезающих – по-разному зависят от величины нагрузки. Выраженная в процентном отношении от общего числа изученных клиньев доля сокращающихся двойников по мере увеличения нагрузки быстро убывает (рис.2), в то время как относительное количество исчезающих двойников практически не зависит от значения действующей нагрузки (рис.3).

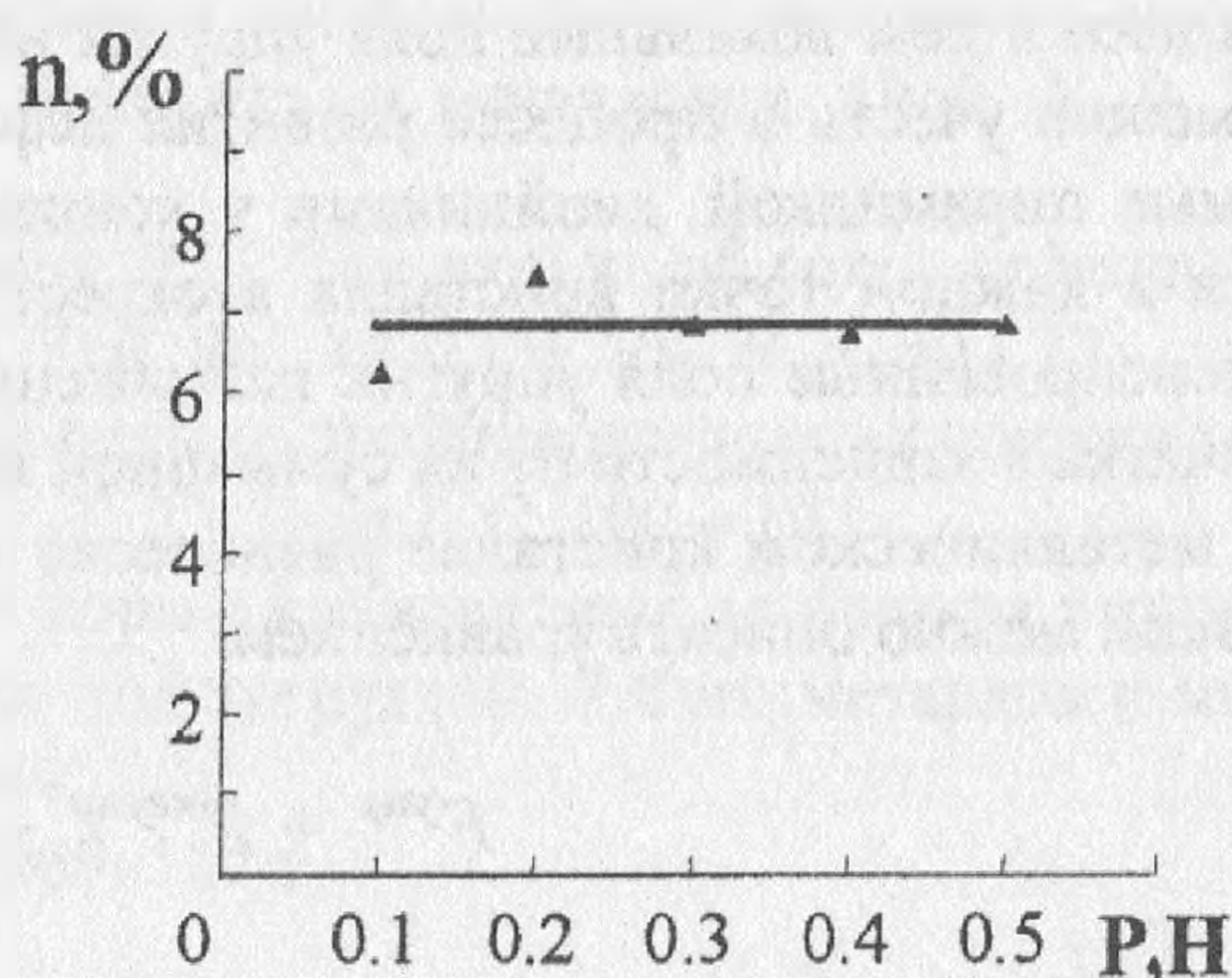
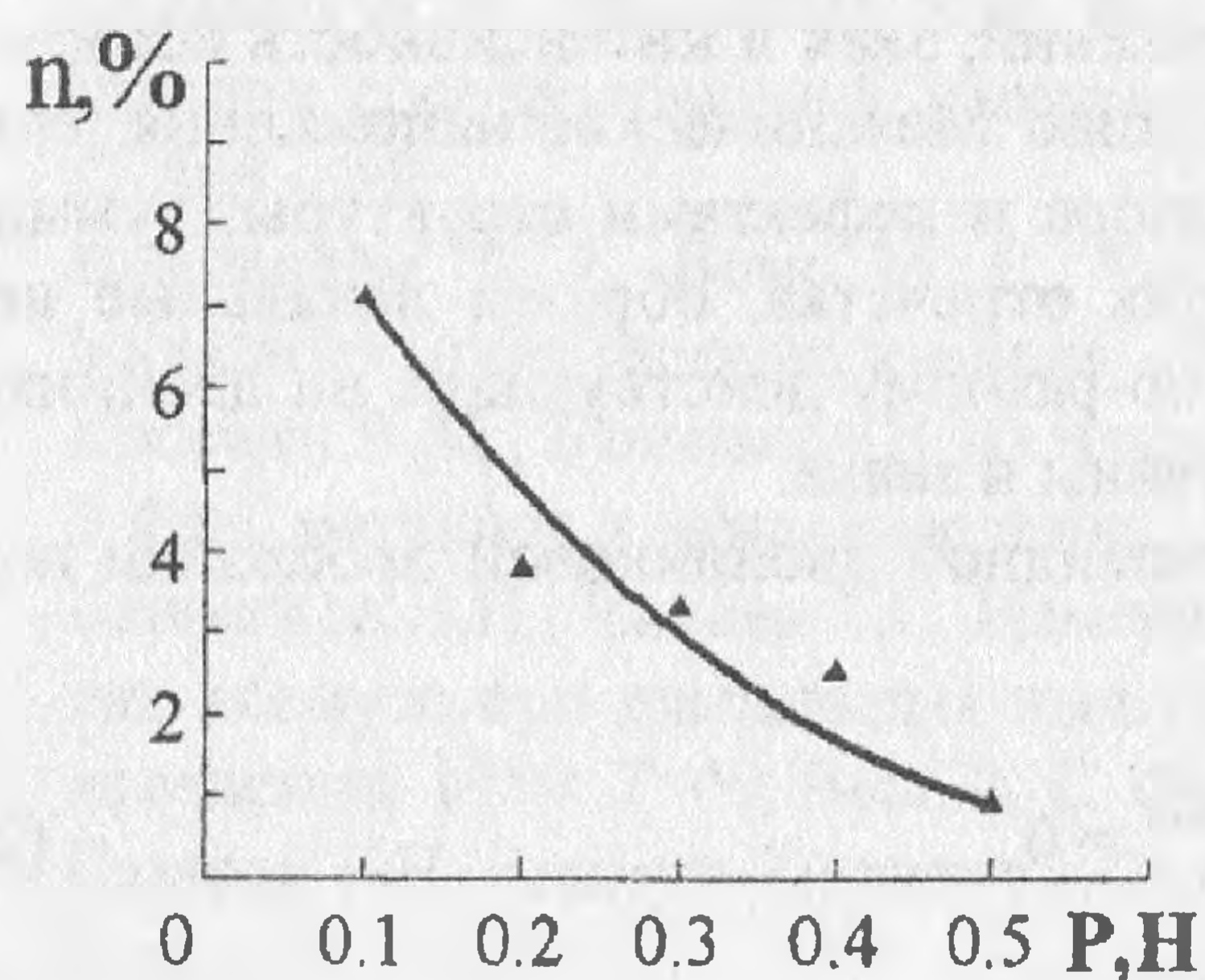


Рис.2. Зависимость количества сокращающихся двойников от нагрузки.

Рис.3. Зависимость количества исчезающих двойников от нагрузки.

Подобные явления не имеют аналогов при чистом двойниковании.

Согласно дислокационным представлениям, клиновидный двойник представляет собой совокупность плоскостей, в которых начато, но не окончено двойникование. Двойниковый клин можно рассматривать как ансамбль двойникующих дислокаций, расположенных по его контуру.

Равновесное состояние изолированного упругого двойника под нагрузкой в случае чистого двойникования обеспечивается равенством нулю всех сил упругого и неупругого происхождения, действующих на единицу длины двойникующей дислокации в ансамбле [3], то есть

$$F^{упр} + F^{неупр} = 0, \quad (1)$$

где $F^{упр}$ – силы, созданные внешней нагрузкой и упругими полями дислокаций ансамбля; $F^{неупр}$ – силы торможения, обусловленные структурой кристалла и наличием дефектов, а также силы поверхностного натяжения, действующие со стороны материнского кристалла на двойник. Рост внешней нагрузки увеличивает первое слагаемое в уравнении (1) и соответственно сообщает движение двойникующим дислокациям в плоскости двойникования в направлении двойникования.

В нашем случае клиновидные двойники находятся в значительно более сложной физической ситуации.

Во-первых, у концентратора напряжений – пирамидки – одновременно зарождается несколько двойников. Поскольку деформация сосредоточена на границах двойниковых прослоек, каждая из них сама становится источником упругих напряжений в кристалле тем более мощных, чем значительнее размеры двойника и сложнее его форма. Очевидно, что наибольшие локальные напряжения возникают у границ отпечатка и в окрестностях двойников с ветвистой структурой (рис. 1, а, двойники «1», «2», «3»).

Во-вторых, предшествующее и сопутствующее скольжение в висмуте насыщает решетку дефектами структуры. Развитие двойника под нагрузкой происходит в условиях взаимодействия двойникующих дислокаций с дислокациями «леса», полосами скольжения и другими структурными несовершенствами, выполняющими двойную роль. С одной стороны, взаимодействия двойника со стопорами тормозят его рост и вносят вклад в неупругую составляющую сил, действующих на дислокации ансамбля. С другой – дефекты различной природы и мощности, нарушая структуру кристалла, порождают в нем локальные поля упругих напряжений, знак и интенсивность которых невозможно учесть в процессе развития деформации. Механические напряжения, создаваемые пирамидкой, двойниками у концентратора и дефектами структуры, суммируются в каждой точке кристалла в окрестностях отпечатка, образуя локальные некомпенсированные поля упругих напряжений, по-разному действующие на двойники у отпечатка в зависимости от их суммарной величины и знака.

В металлическом кристалле равновесие клиновидной двойниковой прослойки под нагрузкой можно описать уравнением:

$$F^{упр} + F^{неупр} + F^{лок} = 0, \quad (2)$$

где третье слагаемое $F^{лок}$ характеризует силы, действующие со стороны локального ориентированного суммарного поля упругих напряжений на двойникующие дислокации ансамбля.

Надо полагать, что именно величина и знак этих сил ответственны за исчезновение двойников. Возвратное движение двойникующих дислокаций от вершины клина к устью возможно при условии, что в области лидирующей дислокации формируются мощные локальные механические напряжения обратного знака, превосходящие усилие, создаваемое внешней нагрузкой.

Замечено, что чаще всего исчезают прослойки двух типов: мелкие двойники, расположенные вблизи контура отпечатка, и двойниковые ветви, зарождающиеся на искривленной границе клиновидного двойника (рис. 1, а., двойник «3»). В обоих случаях эти двойники находятся в зоне наиболее сложной дефектной структуры кристалла, порождающей значительные упругие напряжения.

Для сокращающихся двойников локальные поля упругих напряжений так же играют определяющую роль в обратимом перемещении границ. Однако в отношении этих двойниковых прослоек дефекты структуры выполняют и противоположную функцию – стопорение. Двойникующие дислокации, встречаясь с непреодолимым стопором, останавливаются, процесс раздвойникования прекращается. Тот факт, что количество сокращающихся двойников при увеличении нагрузки уменьшается (рис. 2), свидетельствует об увеличении числа непреодолимых стопоров с ростом внешних напряжений.

Таким образом, в металлическом кристалле в условиях развития группы двойниковых прослоек у концентратора напряжений с ростом внешней нагрузки локальная дефектная структура кристалла, обусловленная сопутствующим скольжением, приводит к развитию двух противоположных процессов на границах двойников – двойникованию и самопроизвольному раздвойникованию.

Список литературы

1. Бойко В.С., Гарбер Р. И., Косевич А. М. Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991. 280 с.
2. Гарбер Р.И. Образование упругих двойников при двойниковании кальцита. //ДАН СССР. 1938. Т. 21, Вып. 6. С. 233 - 235,
3. Косевич А.М., Бойко В.С. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов. //УФН. 1971. Т. 104, Вып. 2. С. 201 - 254.
4. Гарбер Р.И. Механизм двойникования кальцита и натронной селитры при пластической деформации. // ЖЭТФ. 1947. Т. 17, Вып. 1. С. 48 - 62.
5. Косевич В.М., Башмаков В.И. Исследование двойникования металлических кристаллов сосредоточенной нагрузкой.// Физ. мет. и металловед. 1960. Т. 9, № 2. С. 288 - 293.
6. Bashmakov. V. I., Bosin M. E., Pachomov P.L. The motion of non - coherent twin boundaries under repeated loadings. Phys. Stat. Sol. 1972 (a). Vol. 9. P. 69 - 77.
7. Косевич В.М., Башмаков В.И. Изучение отдыха двойникованных монокристаллов. // Физ. металлов и металловедение. 1961. Т. 11, Вып.1. С. 100 – 107
8. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Изменение формы клиновидных двойников в кристаллах висмута при длительных выдержках под нагрузкой. // Физ. металлов и металловедение. 1980. Т. 49, Вып. 2. С. 443 - 445.
9. Глазков Е.Н. Висмут. Ташкент. : Фан, 1969. 116 с.