

05;12

## Реализация двойникования при термоциклировании монокристаллов висмута

© О.М. Остриков

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,  
246746 Гомель, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 1 ноября 1999 г. В окончательной редакции 5 мая 2000 г.)

Изучена роль двойникования в реализации пластической деформации монокристаллов висмута при термоциклировании, заключающемся в периодическом охлаждении кристаллов до 77 К и их нагреве до 373 К. Установлена стадийность развития двойников при термоциклировании монокристаллов висмута.

Эксплуатация технических материалов часто происходит в режиме термоциклирования. Например, при пуске двигателя внутреннего сгорания трущиеся металлические детали нагреваются, а при его остановке охлаждаются. Термические напряжения, возникающие внутри материала при таких условиях его эксплуатации, приводят к изменению его дислокационной структуры, что порой является причиной разрушения. Поэтому изучение влияния термоциклирования, заключающегося в периодическом нагреве и охлаждении кристалла, на механические свойства твердых тел является важной технической задачей. С физической точки зрения представляет интерес изучение процессов, протекающих в кристалле при указанных условиях воздействия на него тепловых потоков.

Релаксация внутренних напряжений в кристалле, обусловленных изменением температуры, не всегда происходит путем реализации скольжения. В ряде технически важных материалов, таких как, например,  $\alpha$ -Fe, Fe+3.5% Si, Ti, AlTi и т.д., релаксация термических напряжений может происходить и за счет двойникования. А так как двойникование часто связывают с появлением в кристалле микротрещин [1–3], то изучение процессов зарождения двойников при термоциклировании может позволить решить задачу о повышении срока эксплуатации технических материалов.

Целью данной работы явилось построение физической картины релаксации термических напряжений в монокристаллах висмута и установление роли двойникования в данном процессе.

### Выбор материала и методика эксперимента

В качестве объекта исследования был выбран висмут как модельный материал [4–6], удобный для достижения поставленной цели (данный материал подвержен двойникованию и не требует большого перепада температур для начала зарождения двойников). При этом закономерности двойникования, установленные на данном материале, могут быть перенесены и на другие металлы, так как по существу двойникоующие дислокации во всех кристаллах

одинаковы и, являясь частичными дислокациями Шокли, отличаются друг от друга лишь величиной и направлением вектора Бюргера.

Монокристаллы висмута выращивались методом Бриджмена из сырья частотой 99.999%. Образцы размером  $4 \times 5 \times 10$  мм получались путем раскола монокристалла вдоль плоскости спайности (111). Благодаря слоистой структуре монокристаллов висмута и хорошо выраженной в нем спайности поверхность раскола не требовала дополнительной обработки для последующего ведения металлографических исследований.

Образцы подвергались действию термических напряжений в результате термоциклирования, заключающемся в охлаждении образцов до 77 К в жидком азоте и последующем нагреве до 373 К в кипящей воде. Один цикл нагрева и охлаждения длился 40 с.

В ходе исследования с помощью оптического микроскопа прибора ПМТ-3 измерялись размеры двойников, фиксировалось время начала их зарождения.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

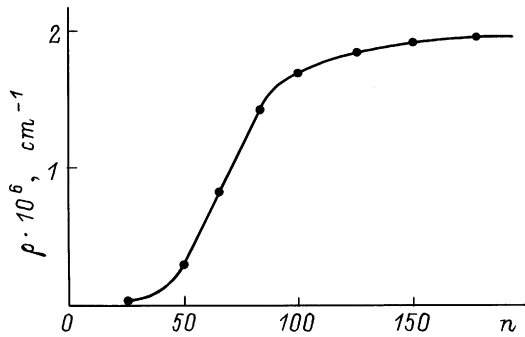
На рис. 1 представлена зависимость плотности  $\rho$  двойников типа  $\{110\}\langle 001\rangle$  на поверхности (111) монокристалла висмута от числа  $n$  термоциклов. Причем

$$\rho = \frac{N}{S}, \quad (1)$$

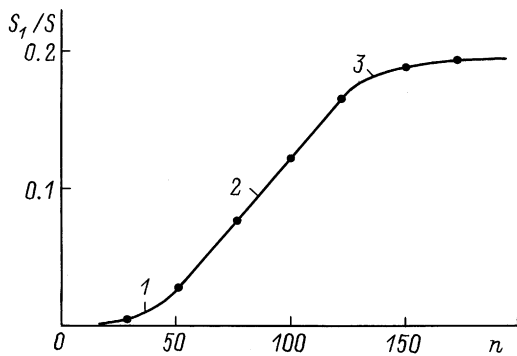
где  $N$  — число двойников на площадке  $S$  поверхности (111) монокристалла висмута.

Как видно из рис. 1, для кривой зависимости  $\rho = \rho(n)$  характерны три стадии: "инкубационный" период ( $n_1$ ), который длится от нуля до 25 циклов; рост числа двойников ( $n_2$ ), длительность этой стадии 25–200 циклов; насыщение ( $n_3$ ) при  $n > 200$ .

Для "инкубационного" периода характерно накопление дислокаций, соответствующих плоскостям  $\{11\bar{1}\}$ . С течением времени процесс генерации дислокаций типа  $\{11\bar{1}\}$  существенным образом затрудняется из-за возникновения со стороны образовавшихся дислокаций напряжений "запирающих" источники дислокаций. Это



**Рис. 1.** Зависимость плотности  $\rho$  двойников на поверхности (111) монокристаллов висмута от числа и циклов нагрева и охлаждения.



**Рис. 2.** Зависимость относительной площади, занимаемой двойниками на поверхности (111) монокристалла висмута, от числа термоциклов. 1–3 — этапы развития двойникования.

приводит к энергетической выгоде процесса двойникования, фактор Шмида которого, как это было указано выше, близок к этому же фактору для скольжения в  $\{11\bar{1}\}$ .

Интересно заметить, что двойникование в большинстве случаев проявляется при затруднении скольжения или запрете на него. В качестве таких запретов общеизвестны такие, как ориентационный, затруднение скольжения при низких температурах или при наличии в кристалле примесей. В данной случае двойникование инициировано энергетически выгодным скольжением в  $\{11\bar{1}\}$ .

На рис. 2 приведена зависимость относительной площади двойников  $S_1/S$ , занимаемой на площадке  $S$  поверхности (111), от числа термоциклов  $n$ . Величина  $S_1$  определялась как сумма произведений длины и ширины отдельных двойников. Измерение данных параметров производилось на поверхности (111) монокристалла висмута. Вид зависимости  $S_1/S = f(n)$  такой же, как и  $\rho = \rho(n)$ , однако трактовка результата, представленного на рис. 2, несколько иная. Во время "инкубационного" периода двойников на поверхности не наблюдалось. Процесс роста  $S_1$  на начальном этапе после 25 циклов осуществлялся преимущественно за счет увеличения числа двойников, длина которых составляла до  $10 \mu\text{m}$ , шириной до  $2\text{--}3 \mu\text{m}$ . Дальнейшее возрастание  $S_1/S$

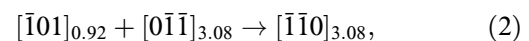
(рис. 2) происходило не только в результате возрастания количества двойников, но и увеличения их длины и ширины. Следует отметить, что изменение размеров двойников в этом случае происходило под действием знакопеременных термических напряжений, в результате периодического нагрева и охлаждения образцов. Изучению влияния знакопеременных напряжений на кинетику двойникования монокристаллов висмута посвящен цикл работ В.И. Башмикова и сотрудников [7–11]. В этих работах были изучены такие явления, как эффект Баушингера и упрочнение двойниковых границ. Согласно результатам работ [10,11], после определенного числа циклов нагружения и разгрузки кристалла двойниковые границы перестают перемещаться в нормальном к ним направлении. То же происходит и при термоциклировании. Достигнув  $20 \mu\text{m}$  (порой и до  $40 \mu\text{m}$ ) длины и  $5 \mu\text{m}$  ширины, двойники перестают развиваться. Это происходит после 200 термоциклов.

Таким образом, в стадии роста двойников при термоциклировании монокристаллов висмута можно выделить три этапа (рис. 2) с характерными для них процессами двойникования.

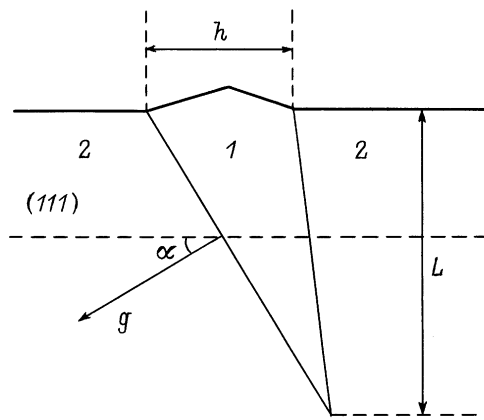
1. Зарождение двойников. Для этого этапа характерно расщепление полных дислокаций системы  $\{11\bar{1}\}$  на частичные двойникоующие с сопутствующим образованием границ раздела двойник–материнский кристалл. Этот процесс, как правило, имеет место благодаря образовавшимся в ходе "инкубационного" периода скоплениям дислокаций  $\{11\bar{1}\}$ . На фоне наличия термических напряжений и затруднения скольжения в  $\{11\bar{1}\}$ , напряжения в таких скоплениях дислокаций могут релаксировать либо за счет реализации базисного скольжения в (111), либо в результате генерации двойникоующих дислокаций типа  $\{110\}/(001)$ . Последний процесс энергетически более выгоден благодаря более высокой величине фактора Шмида и суперпозиции термических напряжений и напряжений, обусловленных дислокациями  $\{11\bar{1}\}$ .

2. Рост числа двойников и их развитие. Увеличение количества двойников на этом этапе обусловлено не только термическими и дислокационными напряжениями, но и напряжениями, создаваемыми в кристалле некогерентными двойниковыми границами. Развитие двойников при этом происходит преимущественно за счет трансляции двойникоующих дислокаций вдоль готовых двойниковых границ, что способствует не только смещению вершин двойников, но и росту двойников в нормальном направлении.

3. Насыщение двойникования. Стабилизация двойниковой картины на поверхности (111) монокристалла висмута и выход кривой  $S_1/S = f(n)$  на насыщение обусловлено упрочнением двойниковых границ из-за образования возле них сидячих дислокаций, которые согласно [12], появляются в результате реакции



где около индексов векторов Бюргерса (справа внизу) дано отношение квадрата величины вектора Бюргерса к



**Рис. 3.** Схема направления действия упругих сил  $g$  границы двойника по отношению к двойниковой границе и плоскости спайности  $(111)$ . 1 — двойник, 2 — материнский кристалл,  $L$  — длина двойника,  $h$  — его ширина.

квадрату параметра решетки кристалла, т. е. относительная энергия дислокации. При этом взаимодействующие дислокации располагаются в плоскостях  $(111)$  и  $(11\bar{1})$ , а результирующая дислокация — в  $(001)$ .

Таким образом, как и скольжение по  $\{11\bar{1}\}$ , двойникование также насыщается (рис. 1). На смену двойникования приходит базисное скольжение в  $(111)$ , которое характерно также и для третьего этапа развития двойникования. Роль термических напряжений в этом случае косвенная ввиду ориентационного запрета на рассматриваемый сейчас способ реализации пластической деформации. Инициаторами базисного скольжения в данном случае (как и в случае последнего этапа двойникования) выступают напряжения скоплений дислокаций системы  $\{11\bar{1}\}$  и двойниковые границы. На рис. 3 показано направление действия упругих сил  $g$  двойниковой границы по отношению к границе двойника и плоскости спайности  $(111)$ . Угол  $\alpha$  на рис. 3 в зависимости от длины  $L$  и ширины  $h$  двойника имеет величину порядка  $10^\circ$ , т. е. фактор Шмида для базисного скольжения, инициируемого двойниковой границей, имеет порядок 0.2.

Очевидно, что базисное скольжение спустя определенное количество циклов также насыщается. Интенсификации этого процесса способствуют двойниковые границы, которые для базисного скольжения выступают стопорами. Это приводит к созданию благоприятных условий для зарождения микротрещин.

Следует отметить, что у недвойникующихся материалов процессы образования трещин при термоциклировании могут реализовываться раньше, чем у двойникующихся, за счет отсутствия затрат энергии на зарождение и развитие двойников. В этом случае двойникование можно рассматривать как резерв пластичности материала, увеличивающий время начала зарождения трещин.

## Заключение

Таким образом, в результате исследования влияния термоциклирования на двойникование монокристаллов висмута установлена стадийность как в развитии двойников, так и в реализации пластической деформации.

## Список литературы

- [1] Финкель В.М., Королев А.П., Савельев А.М., Федоров В.А. // ФММ. 1979. Т. 48. № 2. С. 415–423.
- [2] Федоров В.А., Финкель В.М., Плотников В.П. // Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов. Тула: Тульский политехнический институт, 1979. С. 143–148.
- [3] Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970.
- [4] Остриков О.М. // ФММ. 1998. Т. 86. № 6. С. 106–109.
- [5] Остриков О.М. // ФММ. 1999. Т. 87. № 1. С. 94–96.
- [6] Остриков О.М. // ИФЖ. 1999. Т. 72. № 3. С. 592–594.
- [7] Башмаков В.И., Солдатов В.П. // ФММ. 1963. Т. 16. № 5. С. 768–775.
- [8] Башмаков В.И., Яковенко Н.Г. // ФММ. 1968. Т. 26. № 4. С. 606–609.
- [9] Башмаков В.И., Яковенко Н.Г. // Изв. вузов. Физика. 1969. № 1. С. 48–51.
- [10] Башмаков В.И., Босин М.Е., Лаврентьев Ф.Ф., Папуров И.И. // Проблемы прочности. 1974. № 1. С. 80–84.
- [11] Bashmakov V.I., Bosin M.E., Pachomov P.L. // Phys. St. Sol. 1972(a). Vol. 9. P. 69–77.
- [12] Лаврентьев Ф.Ф. // ФММ. 1964. Т. 18. № 3. С. 428–436.