

УДК 539.375

## СПЕЦИФИКА ДВОЙНИКОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ (111) КОНИЧЕСКИМ ИНДЕНТОРОМ

**О. М. ОСТРИКОВ, В. В. ВЛАШЕВИЧ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** механическое двойникование, монокристалл висмута, конический индентор.

### **Введение**

Исследования процессов возникновения двойников и связанных с ними трещин дают ценные сведения о природе материала, его долговечности и прочности [1]–[5]. Анализ и прогноз на прочность монокристаллов висмута при локальном деформировании его поверхности является актуальной научной задачей.

Целью работы является исследование механического двойникования в монокристалле висмута при воздействии на его поверхность (111) коническим индентором с нагрузкой около 2–5 кгс/мм<sup>2</sup>.

### **Методика эксперимента**

Монокристаллы висмута (Vi) выращены в лабораторных условиях, горизонтальным методом Бриджмена. Для экспериментального исследования монокристаллы Vi раскалывали вдоль плоскости спайности (111). Деформирование поверхности (111) монокристалла выполнялось медным индентором, имеющим конусную форму. Исследования проводились в условиях воздействия на поверхность (111) нагрузок около 2–5 кгс/мм<sup>2</sup>. Анализ деформированной области поверхности монокристалла Vi изучался методом оптической микроскопии.

### **Результаты и их обсуждение**

На рис. 1 представлена остаточная деформационная картина возле отпечатка конического индентора на поверхности (111) монокристалла висмута при высокой нагрузке на индентор. Отпечаток имеет округлую форму. От него в указанном направлении исходят двойниковые прослойки (рис. 1). Это результат воздействия на поверхность монокристалла висмута сверхвысокой сосредоточенной нагрузки. Вокруг отпечатка рассмотрим три области зарождения и развития двойников: I – ромбическая решетка пересечения двойников; II – область двойниковой прослойки; III – область со множеством двойниковых прослоек (см. рис. 1). Более подробно эти области представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 показано скопление двойников, пересекающих друг друга (рис. 2, стрелки 2–6) и не исходящих от отпечатка I (рис. 2). В данном ансамбле наблюдаются линзовидные двойники как с некогерентными (рис. 2, стрелки 2, 3, 5, 6), так и когерентными границами 4 (рис. 2). Рядом с двойником 2 на нижней границе наблюдаются параллельные полосы скольжения  $\delta$ , исходящие от отпечатка I. Из-за большой локализации полос скольжения  $\delta$  нижняя граница двойника 2 имеет вогнутость [2],

обусловленную высокими деформационными напряжениями, вызванными встречным двойником 10. Также на искривление границ двойника влияют концентраторы напряжений, которые способны отталкивать и притягивать двойникующие дислокации [3].

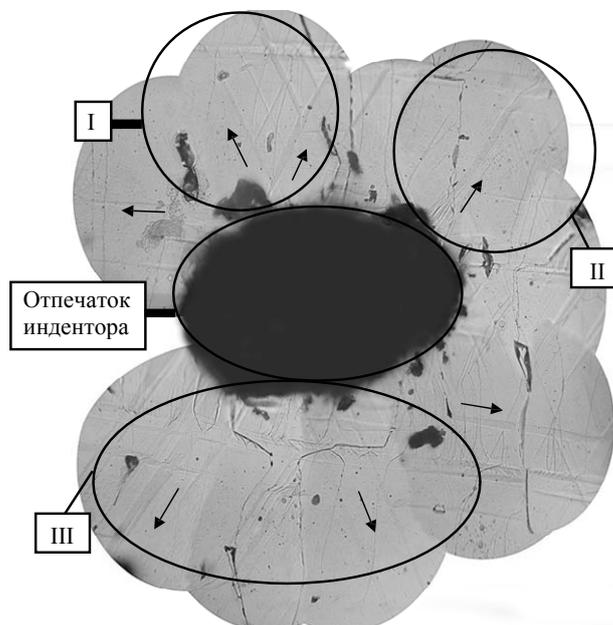


Рис. 1. Ландшафт возле отпечатка на поверхности (111) монокристалла висмута ( $\times 5$ )

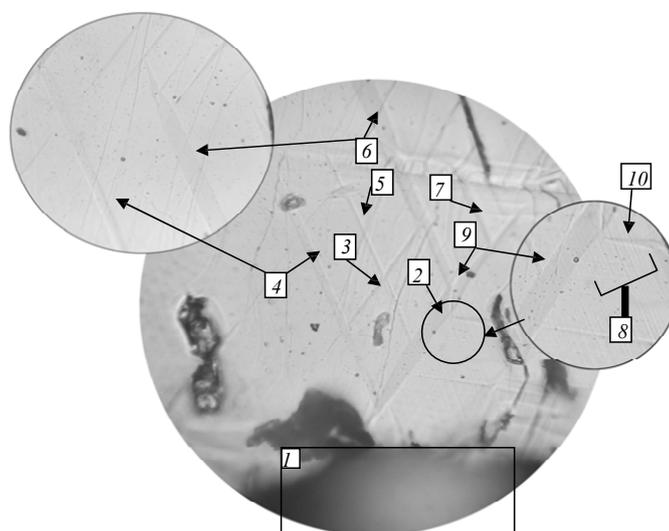


Рис. 2. Ромбическая решетка двойников ( $\times 10$ )

Отметим, что линзовидный двойник 2 на рис. 2 поглощает двойники 4–7, препятствуя двойникованию по другую свою сторону. Такое поглощение показывает, что двойник 2 является непреодолимым препятствием для совокупности двойников 4–7 [4]. Линзовидный двойник 2 содержит в своем теле двойник 9 другого кристаллографического направления. Развитие двойника 9 вызвано сверхвысокими касательными напряжениями; примеры таких вторичных двойников описывались [5], где учитывался фактор Шмида, влияющий на степень активности системы двойникования и скольжения в двойнике.

Тонкий двойник 3 (рис. 2), пересекающий двойники 4–6, в совокупности с двойником 2 образует ромбовидную сетку. Искривление границ двойников 4 и 5 говорит о том, что двойники 4 и 5 не являются непреодолимыми препятствиями для двойника 3.

На рис. 3 представляет интерес прямоугольная область 2, включающая в себя двойниковую прослойку, исходящую от отпечатка 1. Она имеет участки как с когерентными, так и некогерентными границами. Несдвойникованные области, показанные стрелками 3, говорят о том, что двойникующие дислокации преодолели препятствия в виде стопоров и дефектов.

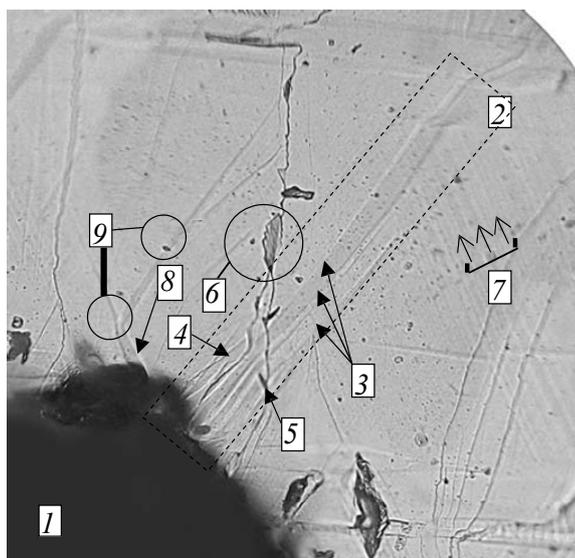


Рис. 3. Двойниковая прослойка с трещинами у отпечатка ( $\times 10$ )

В теле двойниковой прослойки 2 наблюдаются исходящие от отпечатка 1 трещины 4 и 5. При взаимодействии двойниковой прослойки 2 и трещин 4, 5 наблюдается искривление границ ансамбля двойников 3. Такие некогерентные края двойниковой прослойки 2 говорят о высоких деформирующих напряжениях, локализованных в области 6, где наблюдается взаимодействие трещин 4, 5 со структурными неровностями [2]. Местные напряжения представлены полосами скольжения 7.

У двойника 8 в результате взаимодействия двойникующих дислокаций с препятствиями произошло ветвление (области 9). В данном случае такие препятствия выступают в качестве источников двойникующих дислокаций [3].

На рис. 4 представлена картина со множеством двойниковых прослоек 2–4, взаимно пересекающих друг друга. В прослойках наблюдается вторичное двойникование [5] и множественное раздвойникование. В области 2 (рис. 4) наблюдается пересечение вторичных двойниковых прослоек  $2_b$  и  $2_a$  [4], имеющих особенности в своей структуре. Пересечение двойниковых прослоек 3 говорит о частичном торможении одних прослоек другими [4]. От отпечатка индентора 1 и в области пересечения двойниковых прослоек 4 находятся трещины 5. Ветвление трещины 6 у области пересечения двойниковых прослоек 4 говорит о наличии дефектов в окрестностях трещины и действии высокого напряженного состояния, создаваемого пересечением двойниковых прослоек.

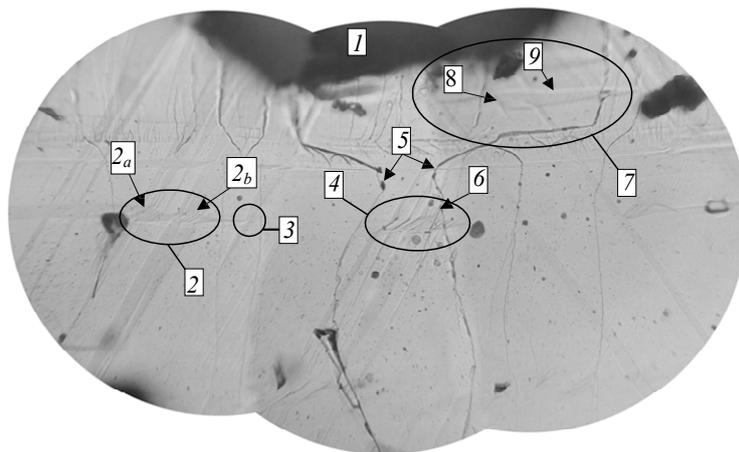


Рис. 4. Область со множеством двойниковых прослоек ( $\times 10$ )

Интересна область 7 (рис. 4), где из-за сосредоточения высоких деформирующих напряжений у отпечатка индентора наблюдается ветвление двойников. При детальном анализе видно, что дочерний двойник 9 намного шире и длиннее, чем материнский двойник 8. Такая картина встречается довольно редко и зависит от уровня напряжений у границы материнского двойника.

#### Заключение

Таким образом, методом оптической микроскопии были исследованы особенности двойникового монокристаллов висмута при воздействии сверхвысоких нагрузок на поверхность (111). Образование ромбовидной сетки двойников вдали от отпечатка индентора говорит о том, что у индентора существует поле остаточных напряжений и структурных изменений, которые вызваны пластической деформацией при индентировании. В теле двойника обнаружены способствующие разрушению монокристалла трещины.

#### Литература

1. Гуткин, М. Ю. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах / М. Ю. Гуткин, И. А. Овидько. – М. : Янус, 2000. – 149 с.
2. Остриков, О. М. Механика двойникового твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
3. Остриков, О. М. Механизмы формоизменения клиновидных двойников в локально деформируемых ионноимплантированных монокристаллах висмута / О. М. Остриков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 4. – С. 8–22.
4. Классен-Неклюдова, М. В. Механическое двойникование кристаллов / М. В. Классен-Неклюдова. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 261 с.
5. Федоров, В. А. Дислокационные механизмы разрушения двойникового металлов / В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тялина. – М. : Машиностроение, 2004. – 336 с.
6. Остриков, О. М. Некоторые особенности формы клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О. М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 90, № 1. – С. 91–95.
7. Остриков, О. М. Ветвление клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О. М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 1999. – Т. 87, № 1. – С. 94–96.