

УДК 669.76:620.186.4

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ (111) В СЛУЧАЕ НАГРУЗОК НА ИНДЕНТОР ВЫШЕ 0,5 Н

Ю. С. КРОТЕНОК, О. М. ОСТРИКОВ⁺

УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», пр. Октября, 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

Изучены физические закономерности и ряд особенностей механического двойникования монокристаллов висмута при индентировании их поверхности (111) алмазной пирамидой Виккерса при нагрузках от 0,5 до 2,0 Н. Установлено, что с увеличением нагрузки на индентор происходит зарождение вторичных групп двойников и поглощение отпечатком первичных двойников. В исследуемом интервале нагрузок активны процессы ветвления двойников, зарождения их вдали от отпечатка индентора, образования микротрещин.

Введение

Физические представления о роли механического двойникования в процессе пластической деформации, разрушения, фазовых превращений полностью не сформированы, спорным и малоизученным остается множество аспектов в двойниковании монокристаллов. Ранее были рассмотрены закономерности, которые наблюдаются в монокристаллах висмута при индентировании поверхности нагрузками менее 0,5 Н [1–5]. Представляет интерес изучение закономерностей механического двойникования монокристаллического висмута при индентировании поверхности (111) алмазной пирамидой Виккерса при нагрузках выше 0,5 Н. Такие исследования ранее не проводились в связи с имеющимися техническими сложностями в проведении экспериментов. Возникает ряд вопросов, связанных с особенностями двойникования монокристаллов висмута при указанных нагрузках на индентор. Дать ответы на эти вопросы и стало целью данной работы.

Методы проведения исследования

Монокристаллы висмута выращивали методом Бриджмена. Образцы призматической формы получали путем раскалывания монокристалла вдоль плоскости спайности (111). С помощью прибора ПМТ-3 осуществлялось деформирование свежесколотой поверхности (111) алмазной пирамидой Виккерса. При изменении угла поворота образца по отношению к граням пирамидки изме-

ряли следующие параметры двойников: длина, ширина у устья, количество двойников у отпечатка индентора. Диапазон изменения нагрузки P на индентор составил от 0,5 до 2,5 Н с шагом 0,5 Н.

Результаты исследования и их обсуждение

При деформировании поверхности (111) монокристалла висмута алмазной пирамидой Виккерса при нагрузке на индентор до 0,5 Н, как правило, среднее количество двойников у отпечатка индентора составляет 6–12 штук. Происходит также зарождение и оптически трудноразличимых тонких двойников длиной менее 10 мкм (рис. 1).



Рис. 1. Схематическое изображение типичной картины ансамбля клиновидных двойников у отпечатка алмазной пирамиды Виккерса на поверхности (111) монокристалла висмута при нагрузке $P = 0,5$ Н

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

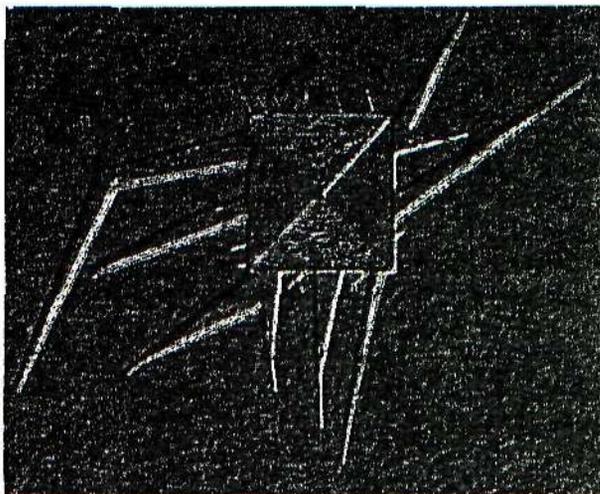


Рис. 2. Схематическое изображение ветвления клиновидных двойников у отпечатка алмазной пирамиды Вickersa на поверхности (111) монокристалла висмута при нагрузках $P = 1,0$ Н и $P = 1,5$ Н



Рис. 3. Искривление клиновидных двойников у отпечатка алмазной пирамиды Вickersa на поверхности (111) монокристалла висмута при нагрузке $P = 2,0$ Н

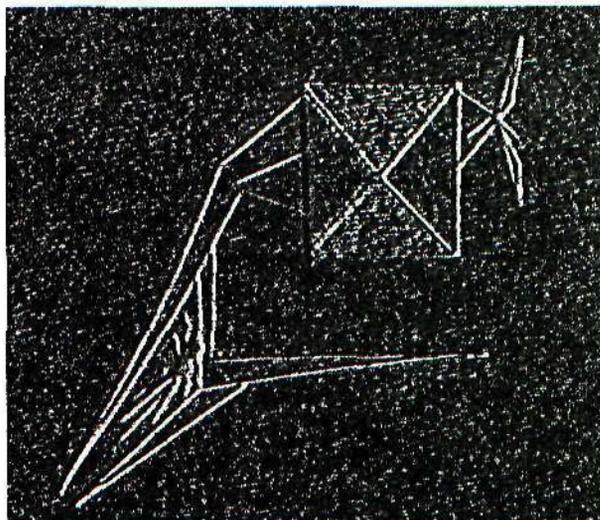


Рис. 4. Зарождение клиновидных двойников вдали от отпечатка индентора при нагрузке на него $P = 2,5$ Н

При увеличении нагрузки на индентор ширина и длина двойников увеличивается. В некоторых случаях, как и в [1], [6], наблюдалось зарождение нового двойника на границе другого двойника (рис. 2). Чаше это наблюдалось при нагрузках на индентор от 1,0 Н до 1,5 Н. В ряде случаев, при нагрузке на индентор 2,0 Н, фиксировалось искривление двойников, развитие которых переходило в другую плоскость двойникования (рис. 3). При нагрузках на индентор 2,5 Н зарождались двойники вдали от отпечатка индентора (рис. 4). Это, как правило, происходило у концентраторов напряжений, в качестве которых могут выступать неоднородности структуры монокристалла, на которых напряжения концентрируются при деформировании твердого тела [7]. При нагрузке на индентор 2,5 Н двойники имеют наибольшую длину (до 3700 мкм), и в местах смены направления двойникования фиксировались случаи образования микротрещин.

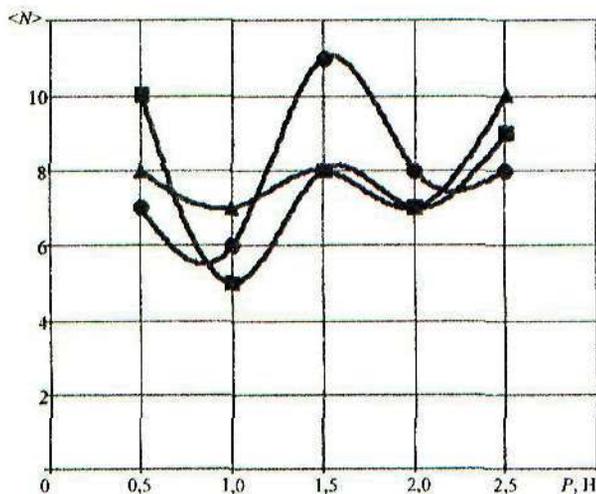


Рис. 5. Зависимость среднего количества двойников $\langle N \rangle$ от нагрузки на индентор P с изменением угла поворота образца относительно индентора: ● — 0° ; ■ — $22,5^\circ$; ▲ — 45°

На рис. 5 представлена зависимость среднего количества двойников $\langle N \rangle$ от величины нагрузки P при изменении угла поворота образца относительно индентора в плоскости, перпендикулярной направлению приложения нагрузки. График зависимости по форме приближается к синусоиде. Наибольшие значения величины $\langle N \rangle$ достигались при нагрузках на индентор 0,5 Н; 1,5 Н и 2,5 Н. Это указывает на активное вторичное двойникование и зарождение новых групп двойников, а при нагрузках 1 Н и 2 Н, происходит вдавливание индентором первичных двойниковых групп, рост которых прекратился. В ряде случаев о первичном двойниковании указывали частично покрытые отпечатком алмазной пирамиды двойники длиной порядка 10 мкм. Таким образом, следует отметить, что в процессе деформирования поверхности (111) монокристалла висмута наибольшую длину клиновидные механические двойники при-

обретают в первые доли секунды после зарождения. При дальнейшем повышении нагрузки на индентор подрастание образовавшихся двойников незначительно. И с ростом геометрических размеров отпечатка индентора мало подрастающие двойники поглощаются им. При этом происходит зарождение новых двойников.

На процесс возникновения двойниковых групп влияет ориентационный фактор Шмида, определяющий анизотропию механических свойств монокристаллов [8]. Поэтому представляет интерес изучение влияния на процесс механического двойникования при локальном дозированном деформировании поверхности анизотропии монокристаллов висмута. С этой целью осуществлялось индентирование поверхности (111) при различных углах поворота кристаллографических

направлений двойникования по отношению к ребрам алмазной пирамиды Виккерса. Полученные результаты (рис. 5) показали, что в целом на вид зависимости фактор анизотропии существенного влияния не оказывает. В большинстве случаев это влияние в рамках погрешности эксперимента. Однако, имеются частные случаи, например, при нагрузке 1,5 Н (см. рис. 5), когда это влияние существенно и должно учитываться.

На рис. 6 и 7 показаны зависимости среднего значения длины всех возникающих у отпечатка пирамиды Виккерса двойников $\langle L \rangle$, от величины нагрузки на индентор P (рис. 6), и среднее значение длины двойника с наибольшим ее значением $\langle L_{\max} \rangle$ в ансамбле двойников у отпечатка в зависимости от нагрузки P (рис. 7). Из сравнения зависимостей, представленных на рис. 5, 6 и 7, следует подтверждение высказанного выше предположения о порционном вторичном двойниковании и малом подрастании первичных двойников. Минимумам на рис. 5 соответствуют максимумы на рис. 6 и 7. Это говорит о том, что вторичное двойникование, проявляющееся при более высокой нагрузке на индентор, характеризуется большими длинами двойников в группах и указывает на доминирующую роль величины P в момент зарождения двойников. Эта тенденция более четко прослеживается при нагрузках на индентор, приближающихся к 2,0 Н.

При нагрузках на индентор около 0,5 Н всплеску на кривой на рис. 5 соответствует спад на кривых на рис. 6 и 7, что указывает на меньшую степень поглощения отпечатком индентора первичных двойников, которые оказывают понижающее значение в среднюю величину длин двойников в ансамбле.

Зависимость средней ширины двойников у устья $\langle H \rangle$ от нагрузки на индентор P представлена на рис. 8. Видно, что ширина двойников практически линейно увеличилась с ростом нагрузки

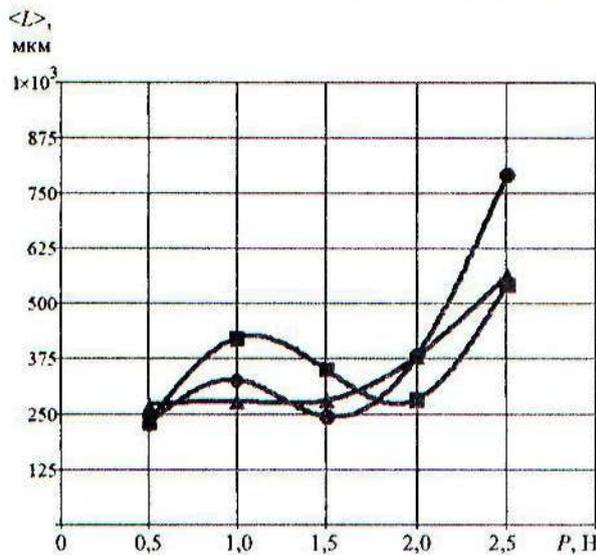


Рис. 6. Зависимость среднего значения длины двойников $\langle L \rangle$ от нагрузки на индентор P с изменением угла поворота образца относительно индентора: \bullet — 0° ; \blacksquare — $22,5^\circ$; \blacktriangle — 45°

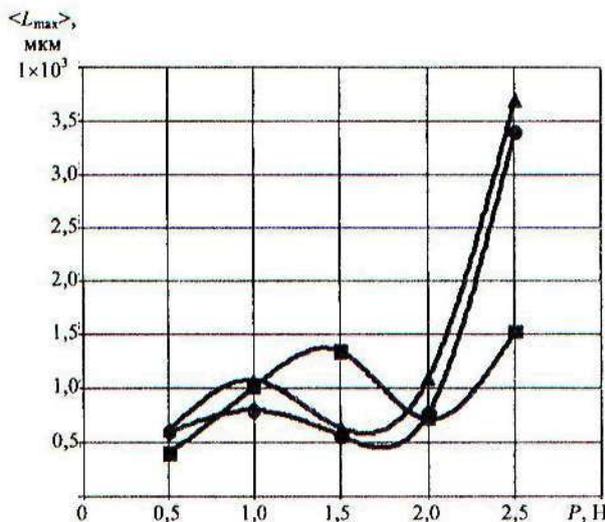


Рис. 7. Зависимость максимального среднего значения максимальной длины двойников $\langle L_{\max} \rangle$ от нагрузки на индентор P с изменением угла поворота образца относительно индентора: \bullet — 0° ; \blacksquare — $22,5^\circ$; \blacktriangle — 45°

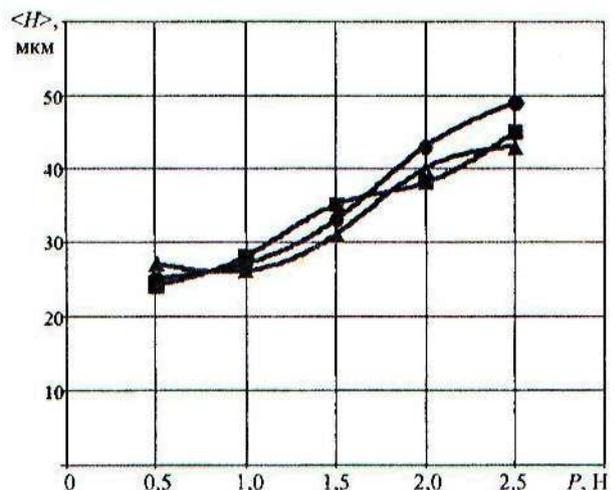


Рис. 8. Зависимость средней ширины двойников у устья $\langle H \rangle$ от нагрузки на индентор P с изменением угла поворота образца относительно индентора: \bullet — 0° ; \blacksquare — $22,5^\circ$; \blacktriangle — 45°

на индентор. Так как при двойниковании в каждой кристаллографической плоскости движется только одна двойникообразующая дислокация [1], то ширина двойников связана с количеством двойникообразующих дислокаций, генерируемых источниками. Поэтому представленный на рис. 8 результат указывает на то, что увеличение нагрузки на индентор ведет к активации работы источников двойникообразующих дислокаций, и на этот процесс, как видно из рис. 8, малое влияние оказывает анизотропия монокристалла висмута.

Заключение

Таким образом, методом индентирования поверхности (111) монокристалла висмута в случае нагрузок на индентор выше 0,5 Н изучены физические закономерности и ряд особенностей механического двойникования. Установлено, что с увеличением нагрузки на индентор растет длина и ширина двойников, при этом также происходит зарождение новых вторичных групп двойников и поглощение отпечатком первичных двойников. При нагрузках на индентор более 0,5 Н активируются процессы ветвления двойников, зарождения их вдали от отпечатка индентора, при этом в ряде случаев двойникование становится инициатором разрушения.

Литература

1. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел / О.М. Остриков. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2008. – 301 с.
2. Савенко, В.С. Двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами бора / В.С. Савенко, В.В. Углов, О.М. Остриков, А.П. Ходоскин // Письма в журнал технической физики. – 1998. – Т. 24, № 8. – С. 1–9.
3. Савенко, В.С. Влияние импульсов электрического тока на двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами углерода / В.С. Савенко, В.В. Углов, О.М. Остриков, А.П. Ходоскин // Физика металлов и материаловедение. – 1998. – Т. 85, № 5. – С. 96–105.
4. Савенко, В.С. К вопросу о двойниковании монокристаллов висмута, облученных ионами циркония / В.С. Савенко, В.В. Углов, О.М. Остриков // Металлы. – 1999. – № 4. – С. 115–118.
5. Савенко, В.С. Электропластический эффект при двойниковании монокристаллов висмута, облученных ионами бора / В.С. Савенко, В.В. Углов, О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 52–55.
6. Остриков, О.М. Ветвление клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О.М. Остриков // Физика металлов и материаловедение. – 1999. – Т. 87, № 1. – С. 94–96.
7. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
8. Федоров, В.А. Дислокационные механизмы разрушения двойникообразующихся материалов / В.А. Федоров, Ю.И. Тягина, В.А. Тягина. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 215 с.

Krotenok Yu. S. and Ostrikov O. M.

Physical laws and features of mechanical twinning of single crystals of bismuth by indentation their surface (111) in the case of load on the indenter above 0.5 N.

The physical laws and a number of features of the mechanical twinning of single crystals of bismuth indentation of (111) surface Vickers diamond pyramid with a load of 0.5 to 2.0 N. It was found that with increasing load on the indenter is the emergence of secondary groups of twins and the absorption of the primary imprint of twins. In the investigated range of loads are active processes branching twins, away from the birth of their indentation, the formation of microcracks.

Поступила в редакцию 10.09.2014.