

УДК 539.21

**ОСОБЕННОСТИ ДВОЙНИКОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА
ВИСМУТА ПРИ СКРАЙБИРОВАНИИ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ (111)
ИНДЕНТОРОМ ВИККЕРСА****Н. М. КУЛЬГЕЙКО, О. М. ОСТРИКОВ***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь***Введение**

О необходимости и целесообразности исследования механического двойникования, как одного из основных механизмов деформации кристаллических материалов, свидетельствуют работы многих авторов [1]–[7]. На протяжении последних десятилетий, несмотря на имеющиеся теоретические и экспериментальные исследования, отмечается [1]–[3], что данный вид пластической деформации и происходящие при этом процессы изучены недостаточно полно и требуют дальнейшего исследования. Экспериментальные исследования процесса двойникования, зарождения и развития двойников выполнялись при различных способах нагружения и режимах деформации: деформировании поверхности различными инденторами, вдавливании лезвия, нанесении царапин, одноосном растяжении или сжатии, изгибе, кручении и т. д.

Целью работы стало изучение особенностей механического двойникования в монокристалле висмута при скрайбировании его поверхности алмазной пирамидой Виккерса.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовали монокристаллы висмута, выращенные горизонтальным методом Бриджмена. Образцы получали раскалыванием выращенных монокристаллов вдоль плоскости спайности (111). Скрайбирование поверхности (111) монокристалла осуществлялось нагруженной алмазной пирамидой Виккерса микротвердомера ПМТ-3 лаборатории «Упрочняющие, восстанавливающие и родственные технологии» машиностроительного факультета УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого». Исследования проводились в условиях последовательного воздействия на конденсированную систему комбинированной нагрузкой: вначале вдавливанием индентора нагрузкой $P = 0,1; 0,2; 0,3$ и $0,4$ Н и затем скрайбированием в направлении одного из ребер пирамиды. Длину царапины ($L_{ц}$) выполняли в пределах $250 \div 500$ мкм. Геометрия и форма двойников и сопутствующая им деформационная картина изучалась методом оптической микроскопии при различных режимах скрайбирования: величина сосредоточенной нагрузки, длина и направление царапины относительно плоскостей двойникования.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена типичная остаточная деформационная картина на поверхности (111) монокристалла висмута при скрайбировании. Рассматривались три области зарождения и развития двойников: I – область опускания индентора (в точке старта индентора); II – область параллельных границ царапины; III – область останковки индентора.

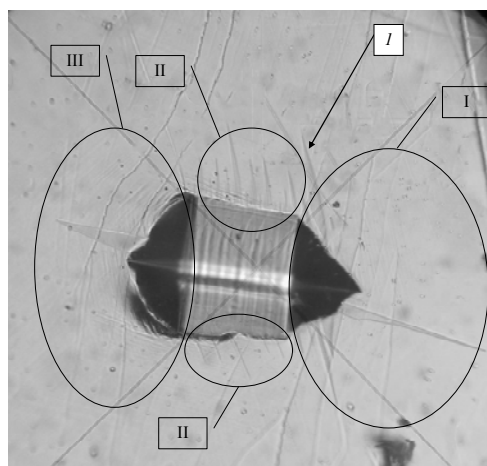


Рис. 1. Области зарождения двойников при скрайбировании индентором:
I – область опускания индентора; II – области границ царапины;
III – область остановки индентора

Общий анализ картины расположения двойников при скрайбировании позволяет сделать следующие выводы. В области I наблюдаются двойники, образование которых связано с геометрическими особенностями индентора при его внедрении в направлении, перпендикулярном плоскости спайности (111) монокристалла висмута, вдоль которой был выполнен скол. При таком способе деформирования клиновидные двойники занимают ограниченный объем у концентратора напряжений.

В области III в исследуемом интервале нагрузок на индентор, как правило, наблюдаются отдельные двойники количеством до трех штук (чаще – один), имеющие геометрические размеры, соизмеримые с размерами двойников области I. Кроме того, в области III имеются четко выраженные полосы сдвига, обусловленные вспучиванием материала в области остановки индентора.

Наибольший интерес представляет область II. Здесь по границам царапины наблюдаются многочисленные двойники часто серповидной формы. С увеличением нагрузки на индентор при скрайбировании поверхности (111) монокристалла висмута абсолютное и относительное количество двойников в области II уменьшается. А при наибольшей исследуемой нагрузке ($P = 0,4$ Н) и относительно небольшой длине царапины, соизмеримой с длиной диагонали отпечатка индентора при его вдавливании нормальной поверхности, в области II образуются единичные двойники. Это связано с ролью силового и масштабного факторов при индентировании, когда на напряженно-деформированное состояние превалирующее влияние оказывает вдавливание пирамиды, чем динамическое воздействие индентора вдоль поверхности в результате скрайбирования.

Количество образующихся двойников с увеличением длины царапины имеет сложную зависимость. При небольшой длине царапины в области II количество остаточных двойников наименьшее. С дальнейшим увеличением длины царапины количество двойников значительно увеличивается, особенно это проявляется при относительно небольших нагрузках на индентор ($P = 0,2$ Н). При большой длине пути скрайбирования количество двойников стабилизируется, а затем происходит их уменьшение. Количество двойников на единицу длины царапины более интенсивно уменьшается по сравнению с их абсолютным значением. Следует отметить, что увеличение количества двойников с увеличением нагрузки на индентор происходит при больших длинах царапины. Так, при $P = 0,2$ Н увеличение количества двойников начинается при $L_{ц} > 300$ мкм; при $P = 0,3$ Н, когда $L_{ц} > 350$ мкм, и при $P = 0,4$ Н, когда $L_{ц} > 400$ мкм. При этом следует отметить, что количество двойников по разные стороны царапины различное.

Двойники области II в зависимости от направления скрайбирования располагаются под углами $45\text{--}80^\circ$ к направлению перемещения индентора. При этом форма двойников в области II в основном серповидная, т. е. одна граница выпуклая, вторая – вогнутая. В частных случаях границы двойников в этой области могут быть и прямолинейными.

В ходе эксперимента преимущественно наблюдались следующие варианты границ двойников: одна – выпуклая, вторая – вогнутая с изломом; одна – вогнутая, вторая – прямая; две вогнутые границы (с минимальным углом раствора при вершине). Кроме того, наблюдаются двойники с расширением сдвойникованной области после участка более узкого устья двойника. Такие двойники с искривленными границами аналогичны двойникам, описанным в работах [5], [8]. Причинами различной кривизны двойниковых границ, как указано в [2] и других работах [1], [9], [10], могут быть различные факторы, в том числе и специфика напряжений в области двойникования при скрайбировании.

В ряде случаев двойниковые ансамбли, образующиеся при скрайбировании, по характеру расположения двойников в области II, т. е. у параллельных границ царапины, можно разделить на два типа: первый – двойники с обеих сторон царапины расположены с наклоном в одну сторону в направлении скрайбирования, т. е. однонаправленные; второй – двойники у одной границы царапины наклонены в сторону направления скрайбирования, а у другой границы – в противоположную сторону, т. е. разнонаправленные.

На рис. 2 представлена картина двойникования с однонаправленными двойниками в области II, образованная при относительно небольшом перемещении индентора. В области I двойники формируются так же, как и в случае индентирования без скрайбирования (двойники 1 и 2 на рис. 2). Двойники в области II (двойники 3, 4, 5 на рис. 2) искривленные, а порой серповидные. У двойника 3 на рис. 2 одна из границ вогнутая. Это указывает на обратное движение двойникующих дислокаций от вершины двойника к устью и на частичное упругое раздвойникование. Искривление двойников 5 (рис. 2) обусловлено особенностями напряженно-деформированного состояния, созданного движущимся индентором. Серповидная форма двойников вызвана неравномерностью распространения дислокаций на границах двойниковой прослойки, т. е. различной их скоростью. Перемещающийся индентор вызывает механические напряжения, под действием которых на двойниковых границах зарождаются двойникующие дислокации последовательно по ходу образования царапины.

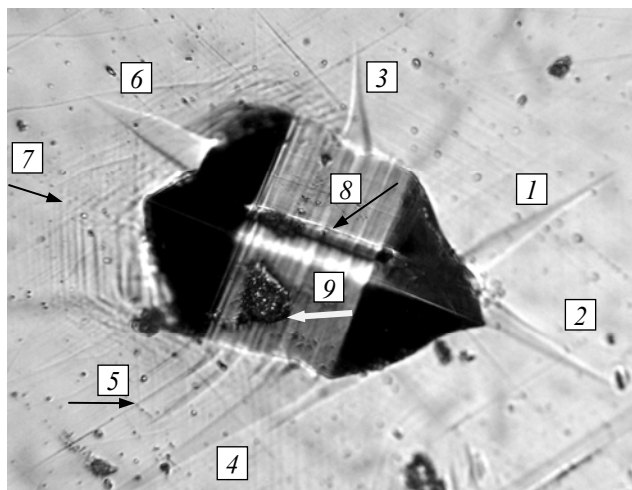


Рис. 2. Картина однонаправленных двойников в области II при относительно небольшом перемещении индентора. Стрелки: 1 и 2 – двойники, образовавшиеся при опускании индентора; 3, 4 и 5 – двойники серповидной формы в области II; 6 – двойник в области остановки индентора; 7 – следы пирамидального скольжения; 8 – след царапания включением, образовавшимся под индентором в результате выкрашивания; 9 – статический элемент выкрашивания

Образование серповидных двойников и соответствующее движение дислокаций не объясняется их взаимодействием с дефектами кристаллической структуры [1], [2], [9], такими как субграницы, макро- и микровключения и т. п. или другими стопорами, которые являются препятствиями движения дислокаций и тормозят их. Дефекты, которые в данном случае могут выступать концентраторами напряжений, распределены по образцу хаотично и не могут привести к наблюдаемому закономерному формированию двойников. Основными факторами, вызывающими неравномерный характер движения дислокаций по границам двойника, является неоднородность распределения напряжений в местах зарождения и роста прослоек [2], так как известно [9], [11], что образование двойника связано со значительной концентрацией напряжений, величина которых уменьшается с расстоянием.

В области III двойник *б* (рис. 2) характеризуется большим отношением ширины двойника u устья $H_{дв}$ к длине двойника $L_{дв}$ ($H_{дв}/L_{дв} \sim 1/5$). Это указывает на большую степень некогерентности границ такого двойника и большую плотность на них двойникообразующих дислокаций.

В конце царапины в области останковки индентора наблюдаются следы пирамидального скольжения *7* (рис. 2), которые образуют при пересечении правильную фигуру – трапецию. Располагаются они преимущественно в области III и указывают на то, что релаксация напряжений при останковке индентора реализуется пирамидальным скольжением и двойником *б* с высокой плотностью двойникообразующих дислокаций на границах.

В области опускания индентора очертания границ его отпечатка слабо криволинейны (рис. 2). Криволинейность границы отпечатка в основном обусловлена двойникованием. Участки царапины в области II также криволинейны в местах зарождения двойников. Форма отпечатка индентора в области III сильно искривленная. На участке образования двойника *б* наблюдается вогнутость границы отпечатка. В области следов пирамидального скольжения *7* форма отпечатка выпуклая.

След *8* (рис. 2) на дне отпечатка является следом царапания включением, образовавшимся под индентором в результате выкрашивания. Статический элемент *9* (рис. 2) образовался в результате выкрашивания материала при скрайбировании.

На рис. 3 представлена картина однонаправленных двойников в области II при большой длине скрайбирования. В приведенном варианте деформационной картины в области III двойники отсутствуют. В области II ближе к вершине двойник *2* (рис. 3) тонкий. Это связано с большим пробегом двойникообразующих дислокаций, но малоактивной их генерацией.

На участке *3* (рис. 3) двойники параллельны полосам скольжения *1*, хоть они чаще возникают в областях пересечения полос скольжения [2]. В области полос скольжения наблюдаются следы выкрашивания материала (на рис. 3 указаны черными стрелками). Белыми стрелками на рис. 3 обозначена система дуговых дефектов, имеющих вид захлопнутых каналов Розе [7]. Они распространяются на значительное расстояние от границы опускания индентора. Граница царапины имеет искривление на участке *3*, вызванное упругим восстановлением отпечатка после прохождения индентора и выкрашиванием кромки царапины. Выкрашивание у вершины отпечатка *4* привело к вытягиванию следа от ребра пирамиды. В области останковки индентора края отпечатка ровные дуговые (белые стрелки *5* на рис. 3). Такая форма границ образована в результате оттеснения материала при относительно большом внедрении индентора (при $P = 0,3$ Н) и значительной пластической деформацией. Деформация привела к образованию наплывов, вспучиванию материала и развитой сетке многочисленных полос скольжения (рис. 3).

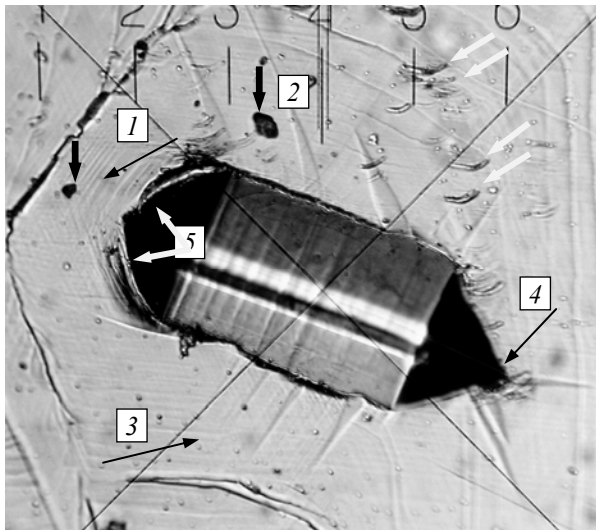
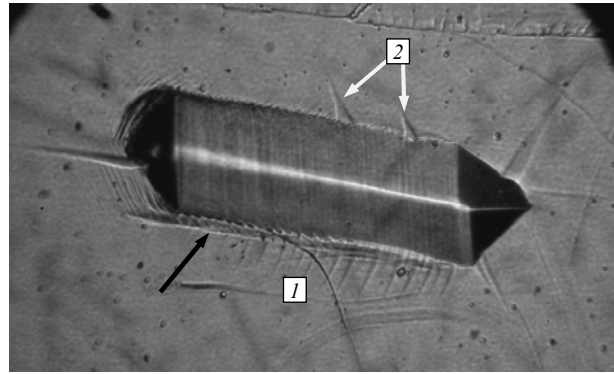


Рис. 3. Картина однонаправленных двойников в области II при большом перемещении индентора

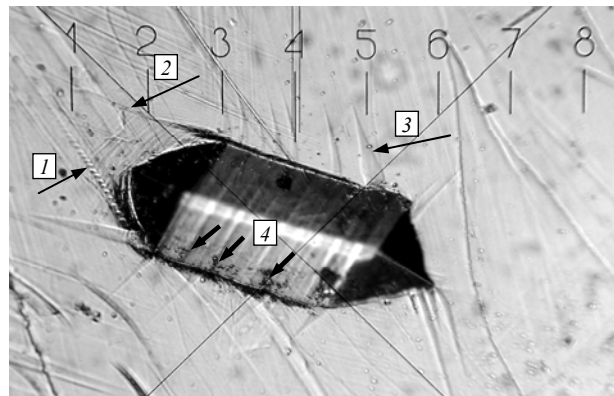
В формировании ансамблей двойников в области II (рис. 3) имеются некоторые особенности. При большой длине скрайбирования количество двойников с обеих сторон царапины сопоставимо. Однако двойникование у двух сторон царапины существенно отличается взаимным расположением двойников и формой их границы. С одной стороны царапины двойники расположены под углом около $80\text{--}85^\circ$ к направлению скрайбирования, а с другой стороны – под углом около 45° и имеют более выраженную серповидную форму (рис. 3).

Иная картина ансамбля двойников в области II наблюдается при перемещении индентора под некоторым углом к направлению скрайбирования (рис. 4). Со стороны идущего впереди бокового ребра образуется от трех до пяти двойников с широким устьем, расположенных под углом $60\text{--}70^\circ$ к направлению скрайбирования. Границы этих двойников имеют различную форму: одна – вогнутая, вторая – выпуклая; обе – вогнутые; одна – вогнутая с изломом, вторая – выпуклая или прямая и т. д. С другой стороны царапины наблюдаются многочисленные плотно расположенные двойники серповидной формы. Угол наклона этих двойников к направлению скрайбирования у устья близок к 90° , а у вершины – от 60 до 80° . Эти двойники имеют обычно небольшую длину с малым разбросом длины (рис. 4). При увеличении ширины царапины, что связано с нагрузкой на индентор, среди ансамбля близких по размерам двойников наблюдаются отдельные двойники длиной более чем в два раза большей.

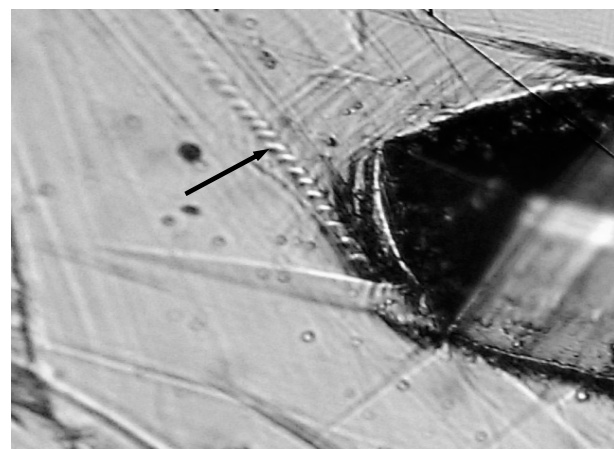
Типичный пример ансамбля двойников при рассматриваемом способе скрайбирования представлен на рис. 4, а. В области II с одной стороны царапины сформировалась система тонких малоразмерных параллельных двойников 1, в то время как с другой стороны всего несколько двойников 2, но большей ширины у устья. Вдоль всей границы царапины со стороны системы малоразмерных параллельных двойников наблюдается, вероятно, бугорок выдавленного материала (на рис. 4 обозначен стрелкой). Его образование может быть вызвано более интенсивным смещением материала от центра к периферии индентора по одной из граней.



а)



б)



в)

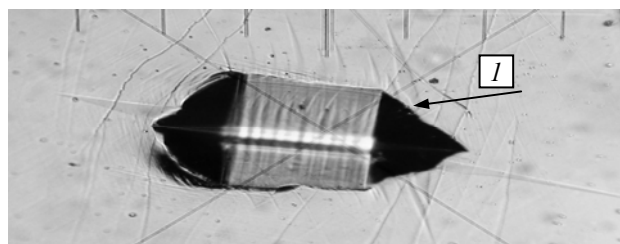
Рис. 4. Картина однонаправленных двойников в области II при скрайбировании под углом к диагонали индентора:
 а – царапина длиной $L_{ц} \gg 450$ мкм; б – царапина длиной $L_{ц} \approx 400$ мкм;
 в – увеличенное изображение системы каналов Розе

Аналогично сформирована деформационная картина, представленная на рис. 4, б. Отличительной особенностью является то, что в области остановки индентора образовалась система каналов Розе 1 [7] в форме прямолинейной цепочки с началом у двойника и постепенным затуханием (в увеличенном виде на рис. 4, в). Двойник 2 на рис. 4, б имеет параллельные слабо некогерентные границы, как у двойниковой прослойки. В отличие от двойников серповидной формы двойник 3 (рис. 4, б) имеет две выпуклые границы. Такая форма может быть вызвана процессом искривления границ

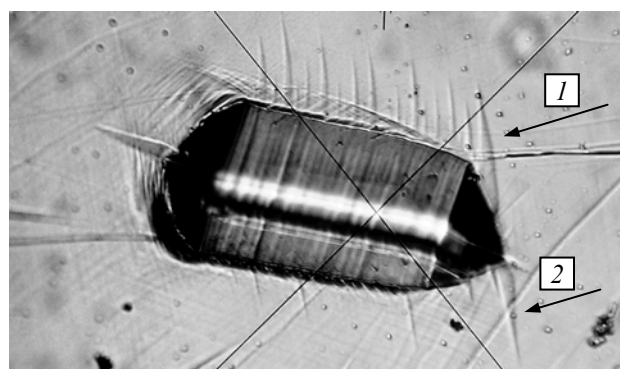
в результате действия напряжений на двойнящиеся дислокации со стороны неоднородностей в монокристалле, находящихся вдали от царапины [2]. В результате на определенном участке границы увеличивается плотность двойнящихся дислокаций, что ведет к увеличению степени некогерентности границы, проявляющемся в увеличении в этих местах ширины двойника [2]. Причиной различной кривизны границ двойника может быть и различная скорость генерации двойнящихся дислокаций. В работе [5] в качестве такого фактора, стимулирующего генерацию дислокаций, указывается другая двойниковая прослойка, создающая в области генерации двойнящихся дислокаций дополнительные напряжения, активизирующие работу источников дислокаций.

На рис. 4, б, также как и на рис. 4, а, в области III отмечается слабо выраженный бугорок выдавленного материала. На противоположной стороне боковой грани царапины ближе к контурной границе имеются четыре следа выкрашивания λ в виде мелких точечных углублений.

На рис. 5 представлены двойниковые ансамбли второго типа, т. е. с разнонаправленными двойниками вдоль двух границ царапины в области II. Аналогично первому типу скрайбирования, когда в области II образовывались ансамбли однонаправленных двойников, в данном случае в области I в группе двойников имеются два–три двойника с большой шириной у устья. А в области III – один, иногда два таких двойника одного направления с двойниками в области I. Форма и расположение двойниковых ансамблей в областях опускания индентора и его остановки после завершения процесса скрайбирования аналогичны для различных вариантов деформирования.



а)



б)

Рис. 5. Картина разнонаправленных двойников в области II:
 а – скрайбирование вдоль диагонали индентора;
 б – скрайбирование под углом к диагонали индентора

Характер расположения двойников в области II существенно отличается от случая однонаправленных двойников: с одной стороны царапины по отношению к направлению скрайбирования двойники направлены в сторону перемещения индентора, а с дру-

гой стороны – в обратном направлении (рис. 5). Двойники обратного направления образуются как при скрайбировании строго по направлению ребра индентора (рис. 5, *а*), так и при перемещении его под некоторым углом к нему (рис. 5, *б*). При этом, как и для ансамбля двойников первого типа (рис. 2–4), у границы царапины, образованной отстающим ребром индентора Виккерса, количество и плотность двойников значительно больше (рис. 5, *б*). Форма двойников направления вдоль направления скрайбирования серповидная, их расположение параллельное, а границы эквидистантны. Для некоторых ансамблей также характерно зарождение двойников перпендикулярно царапине, когда устье двойника расположено под прямым углом к границе царапины в области II, а затем происходит некоторое дугообразное смещение.

Царапина на рис. 5, *а* образована путем скрайбирования при большой глубине внедрения индентора ($P = 0,3$ Н). В этом случае по ходу движения индентора происходит значительная пластическая деформация, возможно разрушение материала по краю царапины и за счет этого ее расширение с выдавливанием материала в области III остановки индентора и образованием дуговых границ отпечатка индентора в этой области (аналогично рис. 3). Условия такого деформирования поспособствовали образованию двойников с широким устьем, особенно в областях I и III. В области I наблюдаются также двойники с областью частично несдвойникового материала (стрелка 1 на рис. 5, *а*).

Картина двойникования на рис. 5, *б* в целом аналогична картине, описанной выше. Но получена она при нагрузке на индентор $P = 0,2$ Н и отличается большим количеством двойников в области II. Интересна ситуация, когда двойники 1 и 2 в области I находятся практически в одной плоскости двойникования.

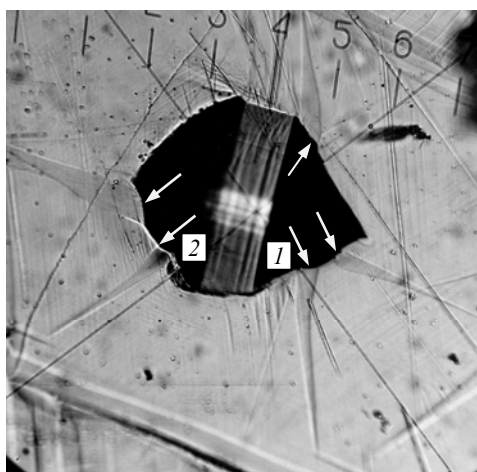


Рис. 6. Ансамбль двойников при малом перемещении индентора с нагрузкой P на него 0,4 Н

Ансамбль двойников на рис. 6 образован в следующих условиях деформирования поверхности (111) монокристалла висмута: большая нагрузка на индентор ($P = 0,4$ Н) и малая длина пути скрайбирования. Таким образом, образование ансамбля двойников на рис. 6 практически соответствует условиям индентирования при статическом вдавливании пирамиды Виккерса. Этому соответствует и картина расположения двойников (рис. 6): самые длинные двойники с широким устьем расположены в областях I и III и сформировались при вдавливании индентора и при его остановке после перемещения. Величина перемещения индентора при этом составила порядка 100 мкм, что почти в четыре раза меньше ширины царапины. При небольшой длине скрайбирования форма царапины претерпевает те же изменения, которые наблюдались на рис. 5, *а*:

незначительное расширение царапины, скругление границ отпечатка индентора в области его остановки (рис. 3). Образование двойников с большой длиной и шириной у устья в областях I и III привело к деформации практически всех границ царапины (на рис. 6 показаны белыми стрелками). Это свидетельствует о большой степени релаксации напряжений за счет образования двойников с большой плотностью двойнивающих дислокаций на границах. На участках 1 и 2 на рис. 6 видны локальные следы скольжения. В целом картина двойникования на рис. 6 содержит различные виды двойников: тонкие двойники, двойники с различной формой границ, двойники с выпуклыми и вогнутыми участками границ, ветвящиеся двойники.

Заключение

Таким образом, с применением метода оптической микроскопии рассмотрены особенности формирования двойников при скрайбировании поверхности (111) монокристалла висмута пирамидой Виккерса. Установлены некоторые закономерности зарождения и развития двойников в зависимости от условий скрайбирования. Выполненный анализ позволил установить, что в различных областях царапины наблюдаются свои особенности формирования двойниковых ансамблей.

Литература

1. Косевич, А. М. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А. М. Косевич, В. С. Бойко // Успехи физ. наук. – 1971. – Т. 104, № 2. – С. 101–255.
2. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
3. Особенности образования механических двойников в закаленном титане / Н. В. Камышанченко [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 4. – С. 84–89.
4. Камышанченко, Н. В. Исследование динамики двойникования в титане ВТ1-0 методом акустической эмиссии / Н. В. Камышанченко [и др.] // Перспектив. материалы. – 2010. – № 5. – С. 93–98.
5. 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.
6. Точицкий, Т. А. Двойникование в наноструктурных пленках и нанопроволоках / Т. А. Точицкий, В. М. Федосюк. – Минск : Издат. центр БГУ, 2009. – 442 с.
7. Федоров, В. А. Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся металлов / В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тялина. – М. : Изд-во машиностроение-1, 2004. – 336 с.
8. Остриков, О. М. Некоторые особенности формы клиновидных двойников в монокристаллах висмута, деформированных сосредоточенной нагрузкой / О. М. Остриков // Физика материалов и металловедение. – 2000. – Т. 90, № 1. – С. 91–95.
9. Класен-Неклюдова, М. В. Механическое двойникование кристаллов / М. В. Класен-Неклюдова. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 261 с.
10. О температурной зависимости роста двойников / В. М. Финкель [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1978. – Т. 46, вып. 6. – С. 1261–1268.
11. Трефилов, В. И. Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Ф. А. Фирстов. – К. : Наук. думка, 1976. – 315 с.