

УДК 539.21

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНИКОВ У ГРАНИЦ ЦАРАПИНЫ ПРИ СКРАЙБИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ (111) МОНОКРИСТАЛЛА ВИСМУТА ИНДЕНТОРОМ ВИККЕРСА

*Н. М. Кульгейко*

магистрант,

ГГТУ имени П. О. Сухого (Гомель)

*О. М. Остриков*

кандидат физико-математических наук, доцент

ГГТУ имени П. О. Сухого (Гомель)

*Изучены закономерности механического двойникования монокристаллов висмута при скрайбировании их поверхности (111) индентором Виккерса. Установлено, что с ростом нагрузки на индентор число двойников у царапины уменьшается. С ростом длины царапины число двойников увеличивается, но при больших длинах царапин скорость роста числа двойников уменьшается. Степень некогерентности двойниковых границ с ростом нагрузки на индентор при скрайбировании увеличивается.*

**Ключевые слова:** деформационное двойникование, скрайбирование, монокристалл висмута.

### Введение

Двойникование наряду со скольжением является одним из основных видов пластической деформации [1–3]. При этом большая часть экспериментальных данных о формах локализации пластической деформации относится к деформации дислокационного скольжения [4]. В то же время характер локализации пластической деформации при двойниковании представляет несомненный интерес. Известные механизмы зарождения трещин [5, 6] в своей основе опираются на пластическое течение кристалла, среди которого значительная роль принадлежит механизмам, обусловленным деформационным двойникованием [2]. Исследование механизма зарождения и развития двойников выполняются при различных способах и режимах деформационного нагружения [1–3]. Среди этого многообразия способов деформирования представляет несомненный интерес исследования закономерностей двойникования при царапании поверхности материала путем скрайбирования индентором, так как при этом моделируется часто наблюдаемая на практике ситуация контактного динамического деформирования твердых тел.

Целью работы является исследование количественных закономерностей образования двойников вдоль царапины при скрайбировании монокристалла висмута пирамидой Виккерса.

© Кульгейко Н. М., 2016

© Остриков О. М., 2016

**Методика эксперимента.** Исследования проводились на монокристаллах висмута, выращенных горизонтальным методом Бриджмена. Образцы получали раскалыванием выращенных монокристаллов вдоль плоскости спайности (111). Образование царапины выполняли на микротвердомере ПМТ-3 путем вдавливания индентора с нагрузкой до 0,4 Н и последующего скрайбирования в направлении ребра пирамиды. Геометрия и форма двойников, их количественная характеристика и деформационная картина изучалась методом оптической микроскопии при различных условиях и режимах скрайбирования.

**Результаты и их обсуждение.** Двойникование в условиях скрайбирования поверхности предварительно внедренным индентором Виккерса целесообразно изучать, выделяя три области образования и развития двойников: область отпечатка двух граней индентора при его опускании; область вдоль границ царапины; область отпечатка двух других граней индентора при его остановке. Картина двойникования в первой и третьей области во многом аналогична образованию двойников при вдавливании индентора [3]. Значительные особенности образования двойниковых ансамблей наблюдаются во второй области, т. е. вдоль царапины.

При изучении механического двойникования при скрайбировании на микрофотографиях царапины следует выделять длину царапины  $L_{ц}$  и величину пути перемещения индентора, т. е. длину скрайбирования  $L_{с}$ . Особенно важно такое разделение в условиях анализа коротких широких царапин, полученных при малой длине пути скрайбирования с большой нагрузкой на индентор. В таких условиях скрайбирования  $L_{с}$  может быть в 2-3 раза меньше  $L_{ц}$ , т. е. след от внедрения индентора больше, чем путь перемещения индентора (рис. 1). Следовательно, основное влияние на образование ансамбля двойников в этом случае оказывает картина двойникования непосредственно у статического индентора. Поэтому при анализе закономерностей двойникования необходимо учитывать особенности образования двойников у статического индентора и вдоль царапины с учетом соотношения  $L_{ц}$  и  $L_{с}$ .

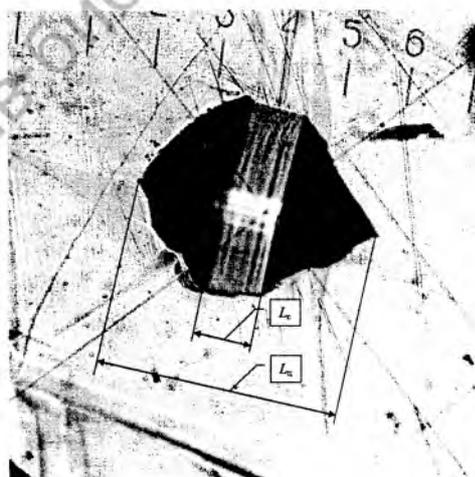


Рис. 1. Область изучения механических двойников вдоль границ царапины  $L_{ц}$  при длине пути скрайбирования  $L_{с}$

На рис. 2 представлены графики зависимости количества двойников  $N_{дв}$ , образовавшихся вдоль царапины, от нагрузки на индентор  $P$  и длины скрайбирования  $L_c$  при различных значениях  $L_c$  и  $P$  соответственно. С увеличением нагрузки на индентор при скрайбировании количество двойников уменьшается (см. рис. 2, а). А при большой нагрузке ( $P = 0,4$  Н) и относительно небольшой длине пути скрайбирования ( $L_c \sim 100$  мкм), меньшей половины длины диагонали отпечатка индентора, во второй области образуются единичные двойники. То есть картина двойникового соответствует расположению двойников у индентора при вдавливании пирамиды без перемещения вдоль поверхности монокристалла. Полученные результаты объясняются проявлением масштабного и силового факторов, которые влияют на величину деформации материала, а также скоростной деформационной зависимости механических характеристик твердых тел [7].

Количество образующихся двойников с увеличением длины пути скрайбирования закономерно увеличивается, так как увеличивается длина границ царапины, т. е. увеличивается область возможного образования источников двойникоующих дислокаций. Однако с увеличением длины пути скрайбирования эта зависимость имеет некоторое отклонение от линейной (рис. 2, б). Как отмечалось выше, при относительно малой длине перемещения индентора, т. е. при  $L_c \ll L_{ц}$  у границ царапины образуются единичные двойники, особенно при увеличении нагрузки на индентор. При небольшой длине пути скрайбирования с большой нагрузкой на индентор механическое разрушение материала подавляет деформационные процессы, изменяя напряженное состояние, вызывающее необратимые пластические деформации. У выхода индентора наблюдаются четко выраженные линии вспучивания материала (стрелка 1 на рис. 3), вызванные деформацией сдвига. Количество же двойников в этой области ограничено (как правило, не более трех). Далее с увеличением длины царапины количество двойников увеличивается, однако интенсивность увеличения несколько замедляется. Это связано с особенностями деформирования и разрушения материала при скрайбировании [8]. Так, отмечаются различные механизмы образования царапин: удлинение отпечатка путем пластического деформирования материала; резание материала с отделением стружки; хрупкое разрушение с диспергированием и скалыванием материала. В данных исследованиях наблюдалось сочетание разных механизмов царапания. Так пластическое деформирование сопровождалось хрупким разрушением с образованием выколов. Об этом свидетельствует форма границ царапины: при пластическом деформировании вдоль ее сторон возникают навалы 2 выдавленного материала; образование выколов 3 и возникновение неровных зазубренных краев 4 (см. рис. 3).

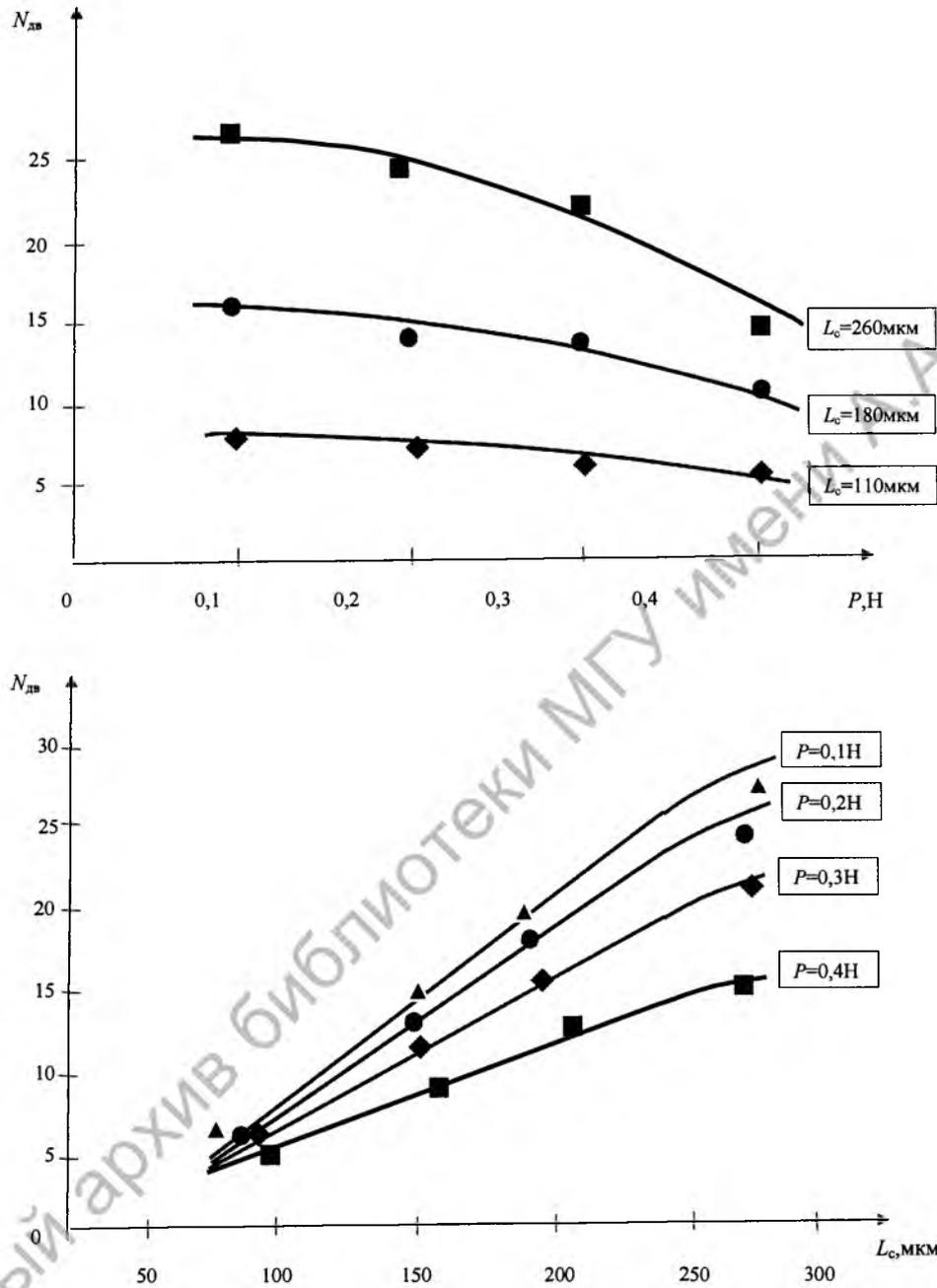


Рис. 2. Зависимость количества двойников  $N_{дв}$  у границ царапины от нагрузки на индентор  $P$  (а) и длины пути скрайбирования  $L_c$  (б)

Механизм царапания зависит от многих факторов [8], в том числе, от величины нагрузки, приложенной к индентору, формы индентора, скорости царапания и др. Увеличение нагрузки приводит к увеличению глубины и ширины ца-

рапины, следовательно, процесс скрайбирования сопровождается значительными деформационными процессами. Это вызывает увеличение навалов материала и неровностей по краям царапины. А образование навалов, впереди индентора, их увеличение и периодическое разрушение с увеличением длины скрайбирования способствует усилению деформаций по ходу образования царапины. В результате происходит релаксация напряжений, в том числе процессами скольжения при остановке индентора, т. е. энергия деформации уходит на скольжение. При этом образование двойников затормаживается, что подтверждается характером зависимости  $N_{дв}$  от  $P$  и  $L_c$  на рис. 2, на котором видно, что с увеличением нагрузки  $P$  количество двойников уменьшается и с увеличением длины скрайбирования несколько падает скорость увеличения двойников.

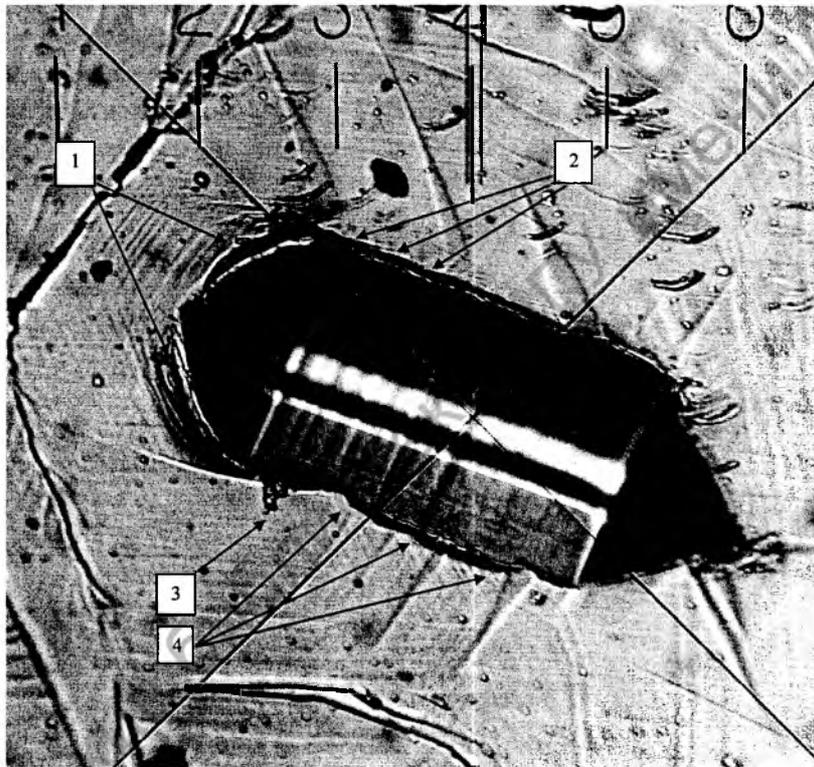


Рис. 3. Форма границ царапины при пластическом деформировании с образованием навалов и зазубренных краев с выколами

Важным фактором, ограничивающим развитие двойникования, является конкуренция со стороны скольжения [9]. Скользящие дислокации способны релаксировать напряжения на различных концентраторах, не давая возможности достичь порога двойникования  $\tau_{дв}$ . Поэтому реализация того или иного вида деформации определяется соотношением между  $\tau_{дв}$  и  $\tau_{ск}$  – критическим напряжением скольжения [2, 3]. Указанные факторы также оказывают существенное влияние на наблюдаемую картину механического двойникования при скрайбировании.

На рис. 4 представлена зависимость отношения  $H_{дв}/L_{дв}$  от нагрузки на индентор  $P$ . Параметр  $H_{дв}/L_{дв}$  характеризует степень некогерентности двойниковых границ и связан с плотностью двойниующих дислокаций на двойниковых границах. График показывает тенденцию зависимости плотности дислокаций от нагрузки, т. е. область нахождения параметра в границах исследуемых факторов  $\Delta P$  и  $\Delta L_c$ . Экспериментальные данные свидетельствуют в целом о росте средних значений степени некогерентности границ двойника с увеличением нагрузки на инденторе при скрайбировании. Так как увеличение ширины происходит более интенсивно по сравнению с увеличением длины, то отношение  $H_{дв}/L_{дв}$  возрастает и указывает на то, что процесс генерации двойниующих дислокаций с ростом нагрузки на индентор активизируется в большей степени, чем процесс активизации подвижности двойниующих дислокаций.

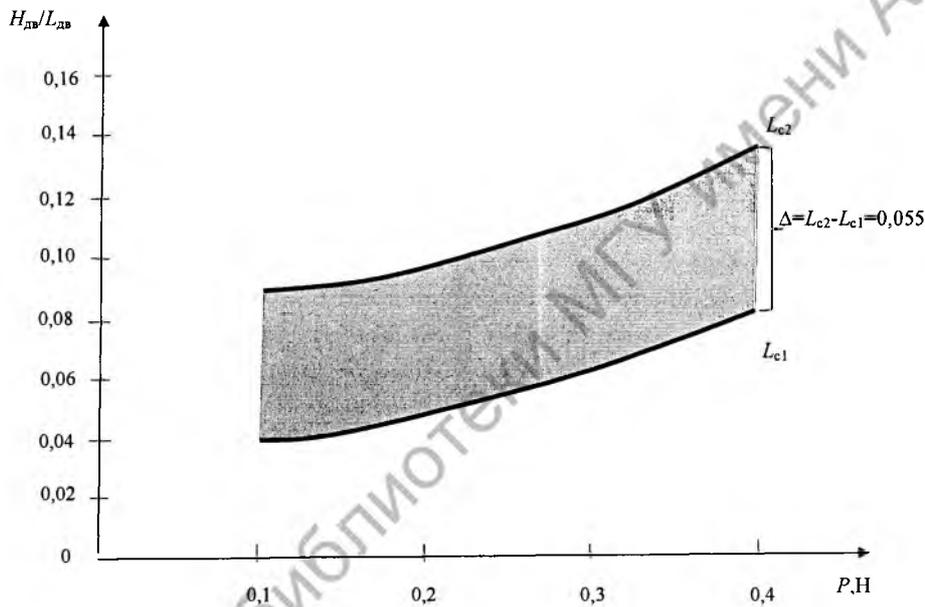


Рис. 4. Область нахождения параметра  $H_{дв}/L_{дв}$  степени некогерентности двойниковых границ в области исследованных значений  $\Delta P$  и  $\Delta L_c$

Результаты исследований свидетельствуют о неоднозначной зависимости геометрических характеристик двойников  $H_{дв}$  и  $L_{дв}$  от конкретных условий (численных значений  $P$  и  $L_c$ ) двойниования при скрайбировании. Это объясняется многофакторной зависимостью механизма образования царапины, о чем сказано выше, а также анизотропией механических свойств кристаллов. Анизотропия свойств проявляется в различной ширине и в различном виде царапин, проведенных вдоль разных кристаллографических направлений. Кристаллы висмута имеют слоистую структуру и обладают совершенной спайностью по плоскостям  $\{111\}$ , параллельным плоскостям слоев, и менее совершенную — по плоскостям  $\{1\bar{1}1\}$ . Установлено, что ширина деформированных зон, возникающих вокруг царапины, растет с увеличением ширины царапины [8]. Плотность дислокаций убывает по экспоненциальному закону по мере удаления от края цара-

пины. Методом многократного травления определено, что релаксационное движение дислокаций, вызванное релаксацией упругих напряжений, в зонах царапины выражено более резко, чем у отпечатков, нанесенных индентором.

В условиях наличия пластической деформации и при большом количестве образующихся дислокаций пластическую релаксацию обеспечивают дислокационные процессы. Обнаружено различие дислокационных зон царапин, проведенных вдоль разных направлений на одной и той же грани кристалла. Таким образом, с учетом имеющихся данных в [8] сделан вывод, что анизотропия твердости связана с тем, что при царапании в разных направлениях скольжение происходит по разным плоскостям и распространяется на разную глубину. Также путем выделения ямок травления обнаружено, что дислокационные зоны царапин могут отличаться в два раза в зависимости от направления образования царапин.

### Заключение

В целом картина двойникового при скрайбировании отличается большой многофакторностью, и, следовательно, большей неопределенностью по сравнению с образованием двойниковых ансамблей при вдавливании индентора. Наиболее значительные особенности двойникового наблюдаются вдоль границ царапины. В результате исследований определены отдельные зависимости формирования двойниковых ансамблей, которые позволили установить некоторые закономерности двойникового при скрайбировании.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Бойко, В. С.** Обратимая пластичность кристаллов / В. С. Бойко, Р. И. Гарбер, А. М. Косевич. – М. : Наука, 1991.
2. **Федоров, В. А.** Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся металлов / В. А. Федоров, Ю. И. Тялин, В. А. Тялина. – М. : Издательство машиностроение-1, 2004. – 336 с.
3. **Остриков, О. М.** Механика двойникового твердых тел : монография / О. М. Остриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 301 с.
4. **Баранникова, С. А.** Локализация пластической деформации двойникового в монокристаллах легированного  $\gamma$ -Fe / С. А. Баранникова, В. И. Данилов, Л. Б. Зуев // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, вып. 9. – С. 63–66.
5. **Владимиров, В. И.** Физическая природа разрушения металлов / В. И. Владимиров. – М. : Металлургия, 1984. – 280 с.
6. **Финкель, В. М.** Физика разрушения / В. М. Финкель. – М. : Металлургия, 1970. – 367 с.
7. **Головин, Ю. И.** Вклад масштабного и скоростного факторов в формирование числа твердости при динамическом наноиндентировании / Ю. И. Головин, А. И. Тюрин, В. В. Хлебников // Актуальные проблемы прочности : материалы XLII междунар. конф., Калуга, 26–29 мая 2004 г. – Калуга, 2004. – С. 97.
8. **Боярская, Ю. С.** Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость / Ю. С. Боярская. – Кишинев : Изд-во “Штиинца”, 1972. – 263 с.
9. **Трефилов, В. И.** Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Ф. А. Фирстов. – К. : Наук. думка, 1976. – 315 с.

Поступила в редакцию 04.06.2015 г.

Контакты: omostrikov@mail.ru (Остриков Олег Михайлович)

**Kulgeiko N.M., Ostrikov O.M. THE LAWS OF TWINS' FORMATION AT THE SCRATCH BORDERS BY SCRIBING THE SURFACE (111) OF BISMUTH SINGLE-CRYSTAL WITH VICKERS INDENTER.**

*The laws of the mechanical twinning of bismuth single crystals while scribing the surface (111) with the Vickers indenter are studied. It has been found out that with the increasing load on the indenter the number of the scratch twins decreases. With the growing length of the scratch the number of twins increases, but with the long lengths of scratches the growth rate of twins is reduced. The degree of incoherence of the twin boundaries with the growing load on the indenter increases in the course of scribing.*

**Key words:** deformation twinning, scribing, bismuth single crystal.