

УДК 539.21

**В.С. Савенко, А.И. Зеленкевич**

## ГЕНЕРИРОВАНИЕ И ПРОБЕГ ДВОЙНИКУЮЩИХ ДИСЛОКАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ

В работе представлены результаты экспериментального исследования кинетики развития двойникования в кристаллах висмута при возбуждении электронной подсистемы металла импульсами тока. Приведен сравнительный анализ стартовых напряжений двойникующих дислокаций в условиях электропластичности металла. Показано, что с ростом плотности тока в импульсе стимулируются процессы генерирования двойникующих дислокаций и их трансляция вдоль готовой поверхности раздела, что открывает возможности дополнительной пластификации двойникующего материала.

Пластическая деформация металлов в зависимости от условий деформации, кристаллического строения реализуется двумя основными способами – скольжением и двойникованием. Двойникование представляет процесс последовательного смещения друг относительно друга атомных плоскостей металла, параллельных плоскости двойникования, на одно и то же расстояние, которое составляет некоторую часть параметра кристаллической решетки металла. Пластическая деформация двойникованием осуществляется и в случае невозможности протекания скольжения, например, при ориентационном запрете, при больших скоростях нагружения и при низких температурах. Двойникование, как правило, начинается у концентраторов напряжений, развитие двойников осуществляется с большими скоростями. При взаимодействии со скользящими дислокациями возникает концентрация напряжений и деформаций на границе двойников, которые часто приводят к разрушению материала.

При деформировании двойникующегося кристалла сосредоточенной нагрузкой на плоскости спайности у концентраторов напряжений появляется по определенным кристаллографическим направлениям система остаточных клиновидных двойников. Клиновидный двойник представляет собой совокупность плоскостей, в которых процесс перестройки решетки в двойниковое положение начат, но до конца не реализован (рисунок 1). Каждая такая плоскость завершается двойникующей дислокацией. Число двойникующих дислокаций на границах двойника составляет  $10^4-10^5 \text{ см}^{-1}$  на единицу длины, дислокации распределены в плоскости двойникования непрерывно с некоторой плотностью  $\rho$ . Предполагается, что все двойникующиеся дислокации краевые или винтовые.

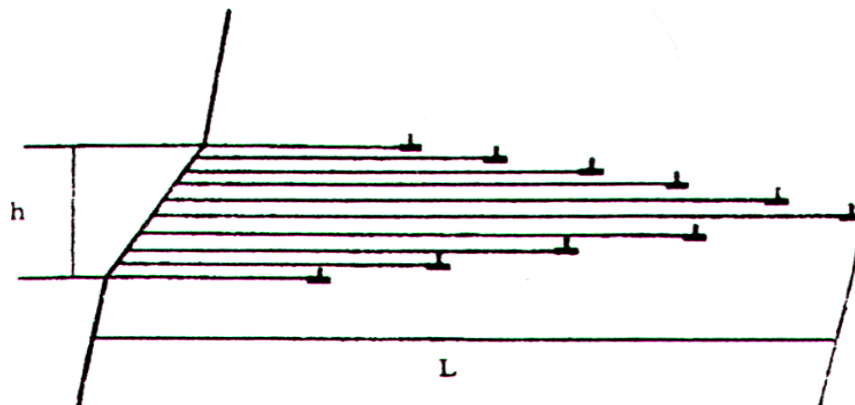


Рисунок 1 – Дислокационная модель клиновидного двойника

Для развития пластической деформации двойникованием необходимо неоднородное поле напряжений. Зарождение и развитие клиновидных двойников на плоскости спайности кристалла осуществляется деформированием в «точке», то есть сосредоточенной нагрузкой.

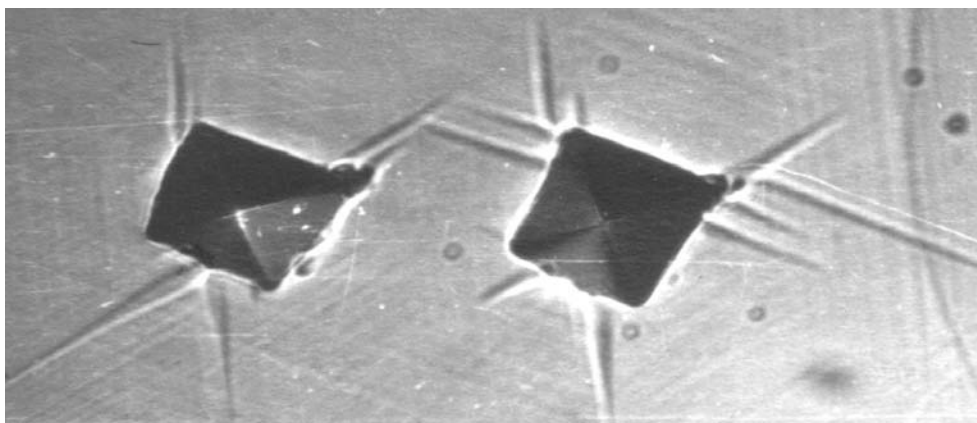
Для исследования кинетики развития двойникования в условиях электропластичности в кристаллах висмута была создана установка, которая позволяла деформировать кристалл двойникованием и одновременно возбуждать электронную структуру образца, пропуская импульс электрического тока большой плотности. С помощью цифрового микротвердомера MicroMet 5114 воспроизводились результаты измерения микротвердости по методу Виккерса. На плоскости спайности (111) монокристалла технического висмута (Bi 96%) вдавливалась алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимали равным 2–15 с, тестовые нагрузки  $P$  были 2–500 г. Микротвердость рассчитывалась по формуле:

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1,854 \frac{P}{d_1^2},$$

где  $P$  – нагрузка на индентор,  $d$  – диагональ отпечатка.

Деформация кристалла сосредоточенной нагрузкой приводит к зарождению на плоскости спайности (111) системы клиновидных двойников. Плоскость спайности кристалла Bi (111) представляет собой ориентационный запрет для скольжения, и по ней идет развитие винтовых составляющих двойникоующих дислокаций клиновидных двойников [1].

При пропускании через металлические монокристаллы висмута импульсов электрического тока с плотностью от 50–1000 А/мм<sup>2</sup> и длительностью 10<sup>-4</sup> с наблюдается перераспределение деформации двойникованием в окрестностях концентраторов механических напряжений.



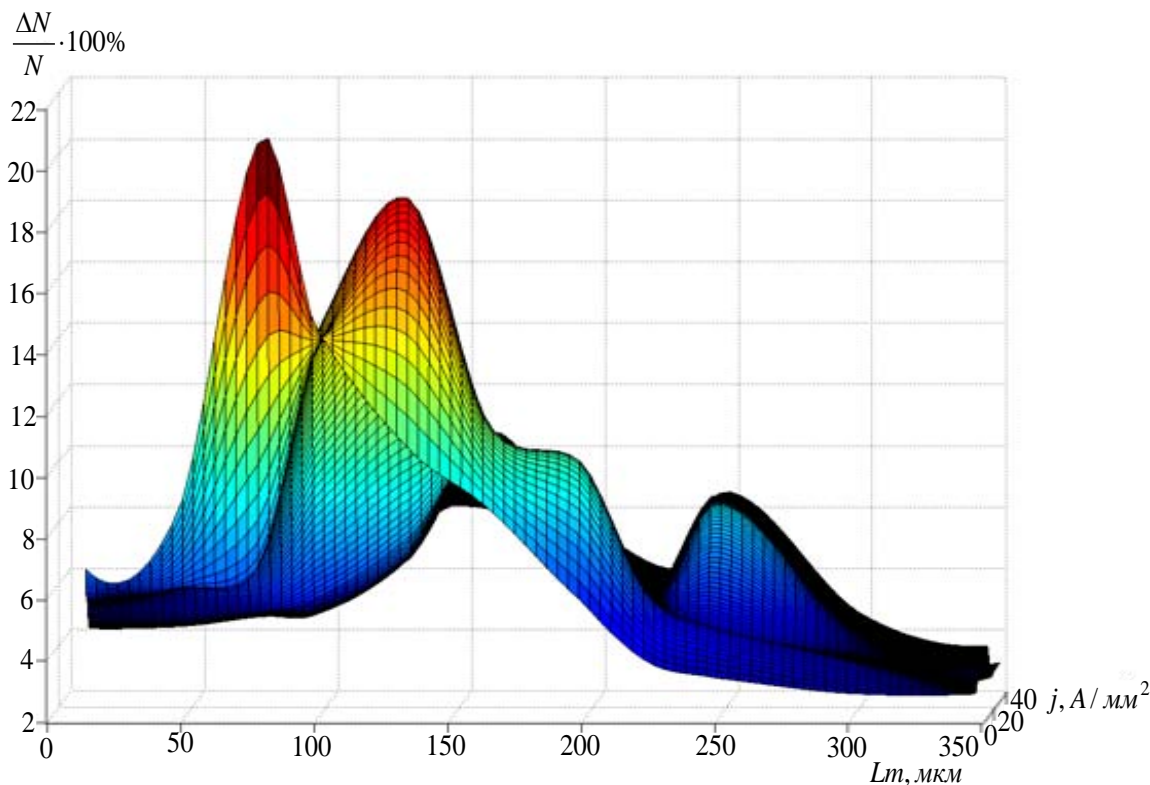
Отпечаток слева получен при нагрузке на индентор 10 г. Отпечаток справа – при той же нагрузке на индентор, но во время деформации через кристалл пропускался импульс тока плотностью 600 А/мм<sup>2</sup> (x 530).

**Рисунок 2 – Микрофотография двойников на плоскости спайности монокристаллов висмута**

Площадь двойниковой перестройки кристалла характеризуется максимальной длиной двойникового луча  $L_m$ , лимитируется уровнем внешних напряжений в вершине

двойника и силами торможения в кристаллической решетке перемещению двойникующихся дислокаций. Последнее, естественно, зависит от локальных нарушений в структуре кристалла, условий деформации и его модификации. Считалось, что распространению максимального двойникового луча меньше всего препятствуют локальные нарушения кристаллической структуры вблизи отпечатка и  $L_m$  характеризует зону пластической деформации, охваченной двойникованием [2, 3].

Импульсы электрического тока, прошедшие через кристалл во время деформирования, не только увеличивают пробег двойникующихся дислокаций, увеличивая зону двойникования, но и возбуждают новые источники двойникующихся дислокаций.

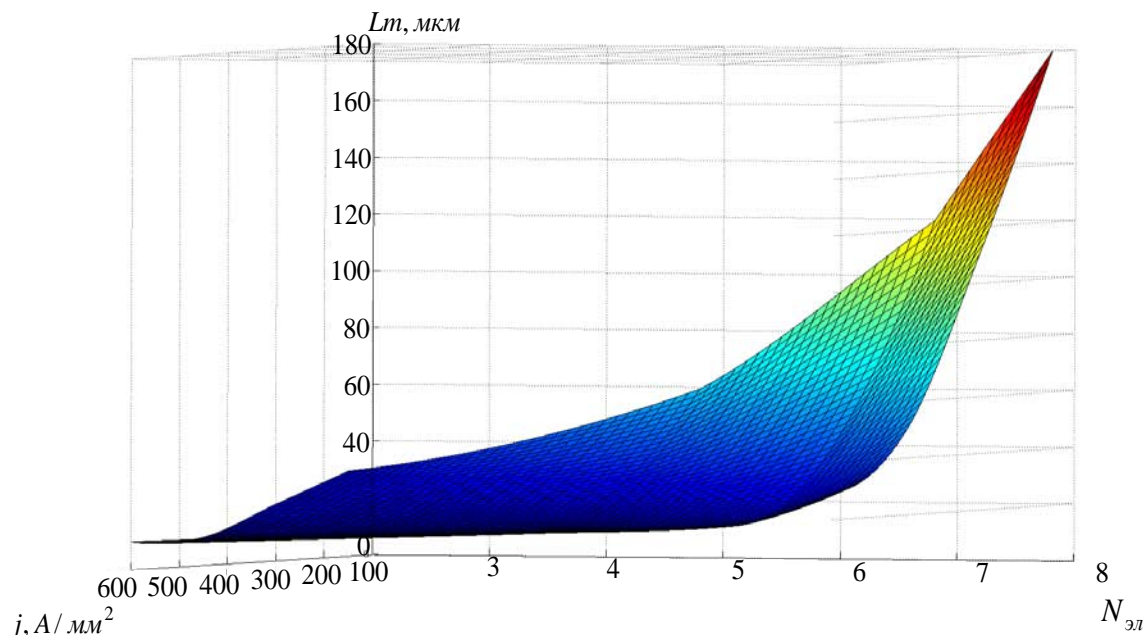


**Рисунок 3 – Количество двойников, возникающих при двойниковании кристаллов висмута от плотности тока в импульсе**

Начиная с порогового значения электропластичности ( $i = 50 \text{ А/мм}^2$ ), увеличивается количество двойников, возникших у отпечатка индентора. Причем возбуждаются не только источники двойникующихся дислокаций, возникшие от механических концентраторов напряжений ( $\frac{\Delta n_{cm}}{n}$ ), но и генерируются новые «электродвойники» ( $\frac{n_{эн}}{n}$ ) в условиях уменьшения стартовых напряжений перемещения двойникующихся дислокаций при возбуждении электронной подсистемы металла. Установлена зависимость между средним объемом клиновидного двойника и количеством всех двойников в кристалле, причем средний объем двойника уменьшается с увеличением объемной доли двойников. То же наблюдается в распределении измеряемых параметров двойникования у отпечатка индентора. С увеличением плотности тока до  $700 \text{ А/мм}^2$  скорость роста числа двойников и их объемной части уменьшается, хотя эффект не достигает насыщения.

Кинетику развития двойникования в условиях электропластичности можно описать суперпозицией нескольких элементарных процессов. Это возбуждение дислокаци-

онных источников двойникоующих дислокаций, уменьшение стартовых напряжений для перемещения винтовых дислокаций, образование поверхности раздела, трансляция двойникоующих дислокаций вдоль готовой поверхности раздела, образование остаточного клиновидного двойника. Следует отметить, что при плотностях тока до  $300 \text{ A/mm}^2$  преобладает процесс возбуждения дислокационных источников, с ростом плотности тока в импульсе стимулируются процессы образования поверхности раздела и трансляции двойникоующих дислокаций вдоль готовой поверхности раздела и завершения процесса двойникования.



**Рисунок 4 – Пробег и генерирование двойникоующих дислокаций от плотности тока в кристаллах висмута**

Изучение большого количества отпечатков показывает, что отношение величины нагрузки на индентор к квадрату максимальной длины двойникового луча у отпечатков – величина, близкая к постоянному значению. Значения  $P/L_m^2$  с изменением нагрузки почти не изменяются для кристаллов одного состава (рисунок 4).  $P/L_m^2$  имеет размерность напряжений и характеризует линейные размеры области кристалла, которая охватывается двойникованием, поэтому естественно считать, что эта величина пропорциональна напряжениям, необходима для продвижения в кристалле двойникоующих дислокаций, тем самым величина  $P/L_m^2$  может служить количественной характеристикой для пластической деформации двойникованием. Отношение  $P/L_m^2$  пропорционально напряжениям, при которых прекращается движение двойникоующих дислокаций, когда дислокации в вершине двойника достигают областей, где внешнее напряжение от сосредоточенной нагрузки уравнивается силами сопротивления кристаллической решетки, т.е. это аналог предела текучести для пластической деформации двойникованием. Порядок величины  $P/L_m^2$  соответствует диапазону стартовых напряжений для двойникоующих дислокаций в кристаллах [4, 5].

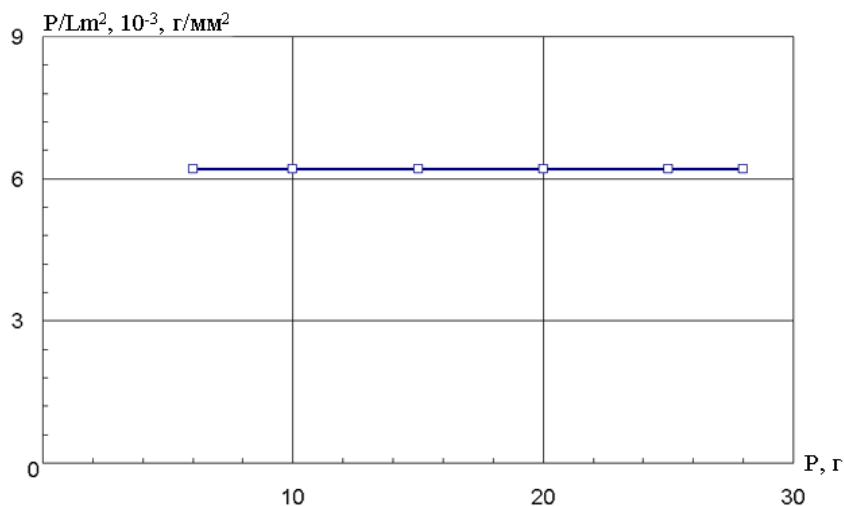


Рисунок 5 – Зависимость величины  $P/L^2 \max$  от нагрузки на индентор в кристаллах технического висмута

На рисунке 6 показана зависимость величины  $P/L_m^2$  от плотности тока в импульсе. Видно, что значения  $P/L_m^2$  начинают падать при плотностях тока в импульсе 50–70 А/мм<sup>2</sup> (пороговые значения электропластического эффекта при двойниковании), затем величина  $P/L_m^2$  значительно уменьшается, и при больших значениях плотности тока в импульсе происходит стабилизация величины  $P/L_m^2$ .

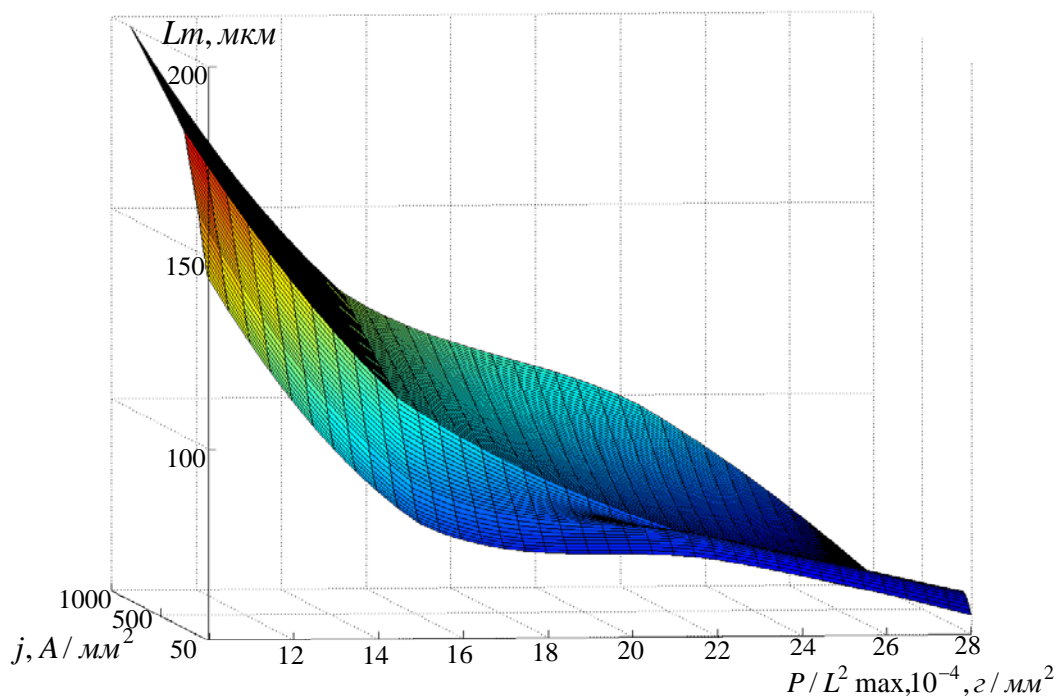


Рисунок 6 – Зависимость величины  $P/L^2 \max$  от плотности тока в кристаллах висмута В1 99,99%

Если рассматривать влияние электрических импульсов тока на развитие двойникования с этой точки зрения, то значения  $P/L_m^2$  при одновременном воздействии внешней нагрузки и импульса тока уменьшаются в несколько раз, т.е. пропускание импульса тока в момент нагружения кристалла сопровождается значительным уменьшением сопротивления кристаллической решетки двойникованию. Таким образом, одновременное действие нагрузки и электрических импульсов дает возможность дополнительной пластификации материала за счет двойникования. При этом импульсы электрического тока повышают долю двойникования в общей пластической деформации двойникующихся материалов, т.е. увеличивают резерв пластичности.

Установлены физические основы кинетики развития двойникования в условиях возбуждения электронной подсистемы металла. Показано, что с ростом плотности тока в импульсе стимулируются процессы образования поверхности раздела и трансляции двойникующих дислокаций вдоль готовой поверхности раздела, увеличивается пробег и генерирование двойникующих дислокаций, что открывает возможности дополнительной пластификации двойникующего материала, повышая долю двойникования в общей пластической деформации, увеличивая тем самым резерв пластичности двойникующихся материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савенко В.С. Анизотропия электромеханического эффекта при двойниковании кристаллов висмута / В.С. Савенко // Физические свойства газов и твердых тел. – Минск : МГПИ, 1979.
2. Remy, L. The kinetics of deformation twinning in face-centred cubic crystals and his relation with sires-strain diagram. – Acta met. – 1978. – Vol. 26, № 3 – С. 433–451.
3. Башмаков, В.И. Возбуждение двойникования в кристаллах висмута импульсами тока большой плотности / В.И. Башмаков, В.С. Савенко, М.С. Цедрик // Изв. АН БССР, Сер. физ.-мат. наук. – 1980. – № 4. – С.109–114.
4. Савенко, В.С. Электронно-пластический эффект при двойниковании монокристаллов висмута / В.С. Савенко, В.И. Спицын, О.А. Троицкий // Докл. Акад. наук СССР. – 1985. – Т. 283, № 5. – С. 1181–1183.
5. Savenko, V.S. Plastification of Bismuth Crustal under Simultaneous Superposition of Electric and Magnetic Fields / V.S. Savenko // Zeitschrift fur METALLKUNDE – 1998. – № 7. – P. 498–500.

#### ***V.S. Savenko, A.I. Zelenkevich. Generating and Run the Dvoynikuyushchikh of Dislocations in the Conditions of Electroplasticity***

In work results of a pilot study of kinetics of development of a dvoynikovaniye in bismuth crystals are presented at excitement of an electronic subsystem of metal by current impulses. The comparative analysis of starting tension of dvoynikuyushchy dislocations in the conditions of electroplasticity of metal is provided. It is shown that with growth of density of current processes of generating of dvoynikuyushchy dislocations, and their translation are stimulated in an impulse along a ready interface that opens possibilities of additional plasticization of a dvoynikuyushchy material.

Рукапіс паступіў у рэдкалегію 11.02.2013