

В. С. Савенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Развитие новых областей техники ставит задачу создания комплексных физико-механических свойств материалов, которые определяются служебными характеристиками — пластичностью, прочностью, хрупкостью и т. д. Реализация этой задачи идет как по пути конструкционных и механико-термических воздействий на кристаллическую решетку, так и с помощью немеханических сил — внешних энергетических воздействий, электромагнитных полей. В частности, электропластическая деформация (ЭПД) [1-9] позволяет улучшить физико-механические характеристики обработанных деталей, повысить ресурс пластичности, уменьшить электрическое сопротивление, что особенно важно для трудно деформируемых и тугоплавких металлов и сплавов. Электропластические технологии пригодны для обработки металлов давлением, позволяют сократить число технологических переходов, расход дорогостоящего обрабатывающего инструмента, снизить энергопотребление. На основе электропластического волочения и прокатки могут быть созданы новые высокопроизводительные способы и технологии обработки давлением ряда технически важных материалов.

До последнего времени основными физическими механизмами, описывающими электропластический эффект (ЭПЭ), являлись силовые модели воздействия электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию металлов. Однако механизмы такого типа не дают непротиворечивого объяснения электропластической деформации, и микроскопическая теория ЭПЭ еще не сформировалась.

Возбуждение свободной поверхности приводит к снижению ее роли как естественного упрочняющего фактора для дислокаций одного знака и увеличивает ее естественное пластифицирующее действие для дислокаций противоположного знака. Можно предположить, что эффективным способом изменения энергетического состояния свободной поверхности является наложение на проводящий кристалл электрического и магнитного поля во взаимоперпендикулярных направлениях. С целью проверки этого предположения проводились эксперименты по изучению деформации монокристаллов висмута в условиях одновременного наложения постоянного магнитного поля и импульсного электрического поля при $V \perp E$.

Изучалось также влияние облучения монокристаллов висмута ионами различных веществ [10, 11].

Монокристаллы висмута выращивались методом Бриджмена из сырья чистотой 99,999 %. Из выращенных монокристаллов образцы получались путем раскалывания вдоль плоскости спайности (111). Сколотая поверхность при этом не требовала дополнительной обработки для ведения микроскопических исследований.

В ходе исследований через кристалл пропускались импульсы электрического тока плотностью до 600 А/мм^2 , длительностью до 10^{-5} с , при этом производилось одновременное деформирование поверхности кристалла сосредоточенной нагрузкой, в качестве которой выступала алмазная пирамидка Виккерса индентора стандартного микротвердомера ПМТ-3.

В ряде экспериментов перпендикулярно направлению импульсного тока прикладывалось магнитное поле величиной $0,4 \text{ Тл}$.

Изучалось влияние облучения ионами углерода энергией 25 кэВ , дозой 10^7 ион/см^2 на процесс пластической деформации монокристаллов висмута при двойниковании.

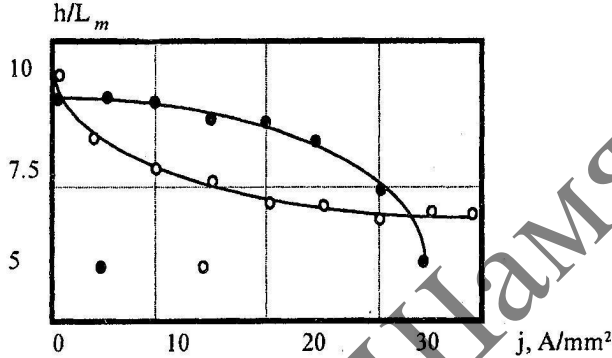


Рис. 1. Зависимость степени некогерентности двойниковых границ от плотности электрического тока, пропускаемого через кристалл, в случае отрицательного — 1 и положительного потенциала — 2 на его поверхности.

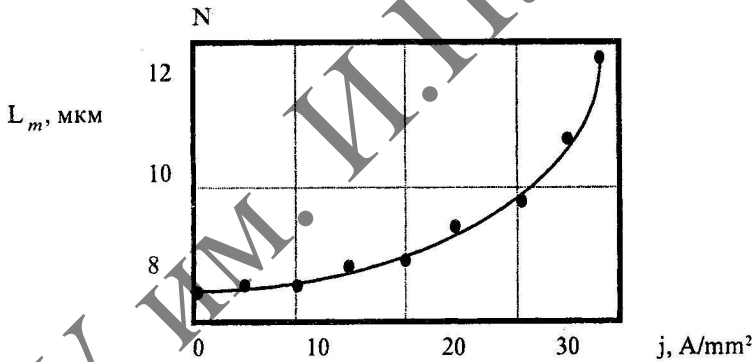


Рис. 2. Зависимость числа двойников у отпечатка индентора от плотности электрического тока, пропускаемого через кристалл.

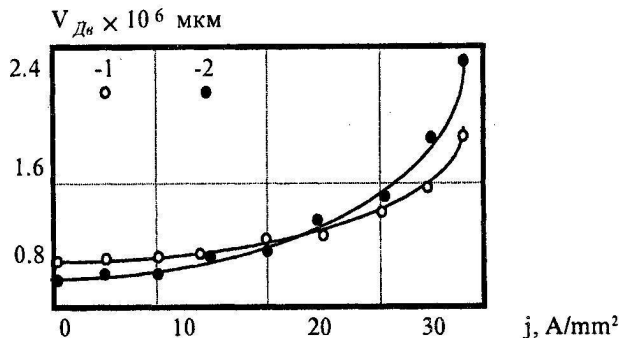


Рис. 3. Зависимость величины двояникового объема от плотности тока пропускаемого через кристалл при положительном — 1 и отрицательном — 2 потенциале на его поверхности.

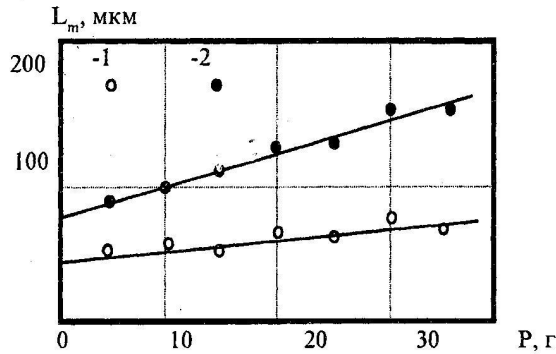


Рис. 4. Зависимость максимальной длины клиновидных двойников от нагрузки на индентор: 1 — необлученный кристалл; 2 — монокристалл висмута, облученный ионами углерода.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 — 4. На рис. 1 показано влияние импульсного тока на степень некогерентности двойниковых границ двойников, возникающих у отпечатка индентора в случае наличия магнитного поля. Из рис. 1 видно, что импульсный ток приводит к уменьшению степени некогерентности двойниковых границ, а следовательно, уменьшению плотности двойникообразующих дислокаций на двойниковых границах. Это показывает, что ЭПЭ при двойниковании в качестве позволяет снизить роль двойников как концентраторов внутренних напряжений и уменьшить вероятность хрупкого разрушения. Стимулирование дислокационных процессов приводит к увеличению числа двойников (рис. 2), возникающих у отпечатка индентора, и к увеличению сдвоенного объема деформируемого кристалла (рис. 3).

Можно предположить, что основная причина пластификации монокристаллов при одновременном наложении на них электромагнитных полей — взаимодействие двойникообразующих дислокаций с возбужденной поверхностью.

Облучение монокристаллов висмута ионами углерода приводит к увеличению подвижности двойникообразующих дислокаций (рис. 4). Данный факт может быть объяснен с точки зрения внутренних напряжений, возникающих в кристалле при наличии в нем имплантированной примеси.

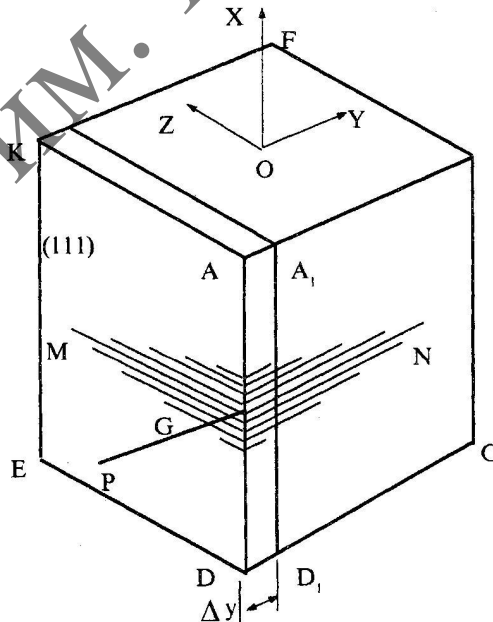


Рис. 5. Двойник в виде совокупности двойникообразующих дислокаций.

На рис. 5 изображен двойник в виде совокупности двойникоующих дислокаций. Плоскость ADEK соответствует плоскости спайности монокристалла висмута (111), а плоскость ABCD является секущей, проходящей через линию действия силы P перпендикулярно плоскости (111). Пусть L — длина двойника в плоскости (111), равная длине отрезка MG (рис. 5), а L_0 — расстояние от поверхности кристалла до головной дислокации, проникающей в глубь кристалла, равное длине отрезка GN . Оси декартовой системы координат выберем направленными так, как показано на рис. 5

В точке N вектор Бюргерса b перпендикулярен линии головной дислокации, а в точке M — параллелен ей. В результате от точки N к точке M головная дислокация плавно переходит от краевой к винтовой. Аналогичная ситуация обстоит и с остальными двойникоующими дислокациями.

Имплантированная примесь в кристалле распределена по закону Пирсона [11]. Распределение Пирсона является экстремальной функцией, поэтому в грубом приближении можно считать, что внедренные в материал ионы находятся на глубине их максимальной концентрации в бесконечно тонком слое. На рис. 5 расстояние от поверхности кристалла до данного слоя обозначено Δy .

Такое представление позволяет считать, что имплантированная примесь в слое Δy создает равномерно распределенные по плоскости, проходящей на расстоянии Δy параллельно поверхности кристалла, напряжения, компенсируемые на плоскости (111) силами поверхностного натяжения. Это дает возможность свести расчет полей напряжений в приповерхностном слое к хорошо известной задаче Прандтля [12-13], согласно которой компоненты тензора деформации для рассматриваемого нами слоя равны:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -p - k(x/h - 2\sqrt{1 - (y/h)^2}), \\ \sigma_{yy} &= -p - k(x/h), \\ \tau_{xy} &= k(y/h),\end{aligned}\tag{1}$$

где σ_{xx} , σ_{yy} — нормальные, а τ_{xy} — скалывающие напряжения [14], $h = \Delta y$ — ширина слоя, k — константа материала, p — произвольная постоянная.

Напряжения, создаваемые в кристалле сосредоточенной нагрузкой P , действующей перпендикулярно поверхности кристалла ($P \perp (111)$), определяются по формуле [14]:

$$\sigma_{rr} = -\frac{2P}{\pi r},\tag{2}$$

где σ_{rr} — радиальная составляющая компонента тензора напряжений, создаваемых силой P , приложенной к точке поверхности упругой среды; P — модуль этой силы; r — расстояние от точки приложения силы до некоторой точки среды.

Вдоль оси OX на крайнюю составляющую двойникоующей дислокации действует сила переползания F_x [15], способствующая преодолению дислокацией при ее движении препятствий в виде дефектов кристаллической решетки, в том числе возникших в результате облучения. Отношение данной силы к длине дислокационной линии L задается соотношением:

$$F_x / L = b \sigma_{yy},\tag{3}$$

где b — модуль вектора Бюргерса, σ_{yy} — нормальные напряжения, возникшие в кристалле в результате внедрения ионов (см. соотношение (1)).

На винтовую составляющую двойникоующей дислокации вдоль оси OZ действует сила F_z , величина которой определяется из выражения:

$$F_z / L = b \tau_{xy},\tag{4}$$

где τ_{xy} — скалывающие напряжения, определяемые из соотношения (1).

Результатом действия этих сил на двойникоующие дислокации является увеличение длины клиновидных двойников.

Следует отметить, что увеличение длины двойникового луча вызвано не только действием дополнительных сил на дислокации при их движении, но и ростом стартовых скоростей двойникоующих дислокаций в результате увеличения стартовых напряжений, обусловленных повышенным напряженным состоянием в приповерхностном слое материала, в котором находятся источники двойникоующих дислокаций.

Очевидно, что в случае нерастворимой в матрице имплантируемого материала примеси с увеличением ее радиуса и дозы облучения будет наблюдаться увеличение силы, действующей на двойникоующие дислокации со стороны имплантированного слоя.

Уменьшение числа двойников, возникающих у отпечатка индентора в облученном кристалле, можно объяснить уменьшением числа источников двойникоующих дислокаций за счет



изменения под действием облучения упругих характеристик приповерхностного слоя, в котором находятся источники двойнивающих дислокаций.

Литература

1. Савенко В. С., Пинчук А. И. К механизму повышения пластичности проводящих материалов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1992, № 1, с. 93-95.
2. Савенко В. С., Пинчук А. И. К вопросу о механизмах электропластической деформации металлов // Изв. АНБ. Сер. физ. -тех. наук, 1993, № 2, с. 27-31.
3. Савенко В. С., Липский Н. П., Пинчук А. И., Шаврей С. Д. Электропластическая деформация арматурной стали // Изв. АНБ. Сер. физ. -тех. наук, 1993, № 1, с. 4-7.
4. Савенко В. С., Троицкий О. А., Липский Н. П., Баранов Ю. В., Пинчук А. И. Электропластическая правка и прокатка стали // Изв. АНБ. Сер. физ. -тех. наук, 1994, № 1, с. 14-17.
5. Савенко В. С., Пинчук А. И., Злотник В. Б., Шаврей С. Д., Понарядов В. В. Электропластический эффект при одновременном наложении электрического и магнитного поля в монокристаллах висмута // Вестник БГУ, сер. 1, 1995, № 2, с. 27-30.
6. Савенко В. С., Пинчук А. И., Злотник В. Б., Шаврей С. Д., Понарядов В. В. Электропластический эффект при одновременном наложении электрического и магнитного полей в области больших плотностей тока // вестник БГУ, сер. 1, 1996, № 2, с. 25-27.
7. Пинчук А. И., Савенко В. С., Шаврей С. Д. Пластификация монокристаллов висмута при одновременном наложении электрического и магнитного поля // Изв. РАН. Физика, 1997, т. 61, № 5, с. 25-27.
8. Савенко В. С., Пинчук А. И. Способ повышения пластичности детали Патент РФ № 2052514. Бюл. № 2. — 4, с. 96.
9. Savenko V. S., Pinchuk A. I., Zlotnik V. B., Shavrey S. D. Plastification of Bismuth Crystals under Simultaneous Superposition of Electric and Magnetic Fields // Zeitschrift fur Metallkunde, 1998, № 7, pp. 498-500.
10. Савенко В. С., Углов В. В., Остриков О. М., Ходоскин А. П. Двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами бора // Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 8, с. 1-9.
11. Савенко В. С., Углов В. В., Остриков О. М., Ходоскин А. П. Влияние импульсов электрического тока на двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами углерода // ФММ, 1998, т. 85, № 5, с. 98-105.
12. Савенко В. С. Новые каналы реализации механического двойникования. // Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 9, с. 43 — 49.

Summary

The article with the problem of existing mechanisms of electroplastic effect — the decrease of deformation when a high density current is passed through a deforming sampl. The existing models do not describe the electroplastic effect completely. On the basis of twinning of bismuth crystals a new model is the easing of outcropping of dislocations by means of the energy decrease.