

$V_{\max}$  и увеличение  $V_{\min}$ . Поэтому зависимости  $V(\varphi)$ , соответствующие различным значениям зазора, будут пересекаться. И если окажется, что  $V_p$  близко к значению магнитной индукции, при которой кривые  $V(\varphi)$  пересекаются, то его значение будет незначительно зависеть от осевых смещений ротора. На рис. 2 представлены зависимости  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  и  $V_p$  от величины зазора и при использовании ферромагнитных стержней диаметром  $d = 4$  мм и высотой  $H = 6$  мм. Если  $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  существенно зависят от величины зазора, то  $V_p$  незначительно изменяется. При изменении  $u$  от 0 до 1,2 мм величина  $\partial V_p / \partial u$  не превышает 0,004 Тл/мм. Таким образом, дискретный преобразователь угла поворота характеризуется устойчивостью к осевым смещениям ротора.

Проведены исследования по влиянию высоты  $H$  и диаметра  $d$  ферромагнитных стержней ротора на параметры  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  и  $V_p$ . Установлено, что  $\partial V_p / \partial d$  достигает значения 0,005 Тл/мм при изменении диаметра от 3 до 5 мм. Величина  $\partial V_p / \partial H$  в области изменения высоты магнита от 5 до 7 мм достигает 0,02 Тл/мм.

Экспериментально определенные величины  $(\partial V / \partial \varphi)_{V_p}$ ,  $\partial V_p / \partial u$ ,  $\partial V_p / \partial d$  и  $\partial V / \partial H$  позволяют рассчитать погрешность угла поворота ротора. Например, если величина осевых смещений ротора достигает  $\pm 0,2$  мм, а высота и диаметр ферромагнитных стержней заданы с погрешностью  $\pm 0,03$  мм, то погрешность угла поворота составляет  $0,1^\circ$ .

1. А. с. № 1768951 СССР. Дискретный преобразователь угла поворота.

2. Ш е п е л е в и ч В. Г. // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1988. № 4. С. 50.

Поступила в редакцию 11.04.94.

УДК 534.8.539.039

В. С. САВЕНКО, А. И. ПИНЧУК, В. Б. ЗЛОТНИК,  
С. Д. ШАВРЕЙ, В. В. ПОНАРЯДОВ

## МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛОВ

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

К настоящему времени хорошо известны электропластический эффект (ЭПЭ) и магнитопластический эффект (МПЭ) в металлах и ионных кристаллах, фотомеханический эффект (ФМЭ) и электромеханический эффект (ЭМЭ) в полупроводниках. Их сущность заключается в снижении усилий деформации и уменьшении микротвердости при помещении образцов в электромагнитные поля или при освещении, как в случае полупроводников. Открыт и исследован ЭПЭ при двойниковании металлов, обнаружено улучшение физико-механических характеристик медной проволоки при электропластической деформации [1, 2]. Теоретические модели, описывающие все эти явления, делятся на две большие группы:

1. Силовое влияние на движущиеся дислокации со стороны внешних энергетических воздействий непосредственно или с помощью промежуточных механизмов.

2. Снижение потенциальных барьеров для движущихся дислокаций.

К первой группе относится описываемая ЭПЭ в металлах модель «электронного ветра», которая уже нашла широкое применение в промышленности. Суть ее заключается в резком скачке пластической деформации при пропускании тока плотностью порядка  $10^8$  А/м<sup>2</sup>. Он проявляется в виде характерных сбросов деформирующего усилия на диаграмме растяжения или сжатия образцов [3].

Экспериментально установлено, что скачки не связаны с тепловым расширением образцов и их разупрочнением в результате джоулева нагрева электрическим током, а также с пинч-действием импульса тока

высокой плотности [4, 5]. Согласно указанной модели, электроны проводимости передают импульс дрейфовой скорости дислокациям при рассеянии на них. Сила, действующая на дислокацию, пропорциональна плотности тока [6, 7]:

$$f = -\hat{B}j/en, \quad (1)$$

где  $\hat{B}$  — тензор коэффициентов электронного торможения дислокации,  $e$  — элементарный заряд,  $n$  — концентрация электронов проводимости. Максимальное значение  $B$  находится по формуле:

$$B = 4\hbar n \approx 10^{-4} \text{ гр/см} \cdot \text{с},$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка [8].

Принципиальной особенностью силы (1) является ее независимость от направления вектора Бюргера. Экспериментальные результаты показывают, что величина ЭПЭ пропорциональна квадрату  $j$  и на четыре порядка выше, чем следует из (1). Выдвигаемое представление о «локальном разогреве» в области ядра дислокации не описывает физическую природу ЭПЭ, поскольку порождаемая дислокацией неоднородность температурного поля успевает исчезнуть прежде, чем произойдет открепление дислокации от локальных стопоров [7].

Рассеяние электронов проводимости происходит не только на дислокациях, но и на других дефектах кристалла. В результате формируется внешнее поле напряжений для дислокаций. Наиболее эффективными здесь являются планарные дефекты. В результате торможения электронной жидкости появляется напряжение сдвига:

$$\sigma_{if} \approx P p_F j / c,$$

где  $P$  — параметр Фукса диффузности рассеяния ( $0 \leq P \leq 1$ ),  $p_F$  — импульс Ферми.

Это напряжение складывается с напряжением от внешних деформирующих усилий. Для  $j = 250 \text{ А/мм}^2$  величина  $\sigma \approx 10^3 \text{ Па}$  [9]. Следовательно, этот эффект не создает напряжений в решетке, которые появляются при ЭПЭ.

Допустив, что положительная часть деформационного потенциала дислокаций экранирована полностью локализованными на нем электронами проводимости, можно оценить порядок электростатической силы, действующей на отрицательную часть деформационного потенциала с плотностью заряда:

$$\rho_-(r) \sim \text{const } r^{-5/2} \sin(2k_F r + 1/4\pi),$$

где  $k_F$  — волновой вектор электрона на поверхности Ферми,  $r$  — радиус-вектор в плоскости, перпендикулярной оси дислокации,  $|\rho_-(r)/en_0| < 0,13$ , где  $n_0$  — невозмущенная плотность ионов решетки [10]:

$$f_e = -q_d E, \quad E = \rho j, \quad (2)$$

где  $q_d$  — заряд деформационного потенциала дислокаций на единицу ее длины,  $\rho$  — удельное сопротивление металлов.

Оценка показывает, что сила (2) по порядку величины сравнима с силой (1) «электронного ветра». Попытка объяснить ЭМЭ силовым действием электрического поля на заряженные дислокации, а ФМЭ электростатическим взаимодействием заряженных под действием света дислокаций также встречает затруднения. Так, например, в [11] отмечается, что и ФМЭ и ЭМЭ наблюдаются в поверхностных слоях одинаковой величины полупроводниковых кристаллов кремния и германия и полуметаллов висмута и сурьмы, составляющих от 1,5 до 3 микронметров, что на 2—3 порядка превышает толщину фотопроводящего слоя. Этот факт указывает на единый физический механизм обоих эффектов. Причем он не может быть выработан на базе концепции электростатического действия на заряженные дислокации.

Вторая группа физических моделей, описывающих влияние электромагнитных полей на деформационные характеристики кристаллов за счет понижения дислокационных потенциальных барьеров, активно

развивается в течение нескольких последних лет. В [10] предложен один из возможных механизмов ЭПЭ — возбуждение локализованных состояний на дислокации. Электроны локализуются на положительной части деформационного потенциала дислокаций:

$$\rho_+(\mathbf{r}) = \frac{e_0 \mathbf{b}}{r} \sin \varphi, \quad \mathbf{b} = \frac{Zeb}{2\pi} \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right),$$

где  $\varphi$  — угол между векторами  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{r}$ ,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $Z_e$  — заряд иона,  $\mathbf{b}$  — вектор Бюргерса [10].

Внешние энергетические воздействия возбуждают локализованные электронные состояния на потенциале (5). При этом, очевидно, происходит размытие их волновых функций. Увеличение электронной плотности в ядре дислокаций понижает величину потенциального барьера типа Пайерлса—Набарро. Уменьшением крутизны рельефа этого барьера в [12, 13] также объясняется и механизм магнитоэластического эффекта в NaCl и Al, суть которого заключается в перемещении под действием магнитного поля дислокаций в ненагруженных исследуемых кристаллах. До помещения кристалла в магнитное поле дислокации находятся в равновесии, зависая в далекодействующем поле внутренних напряжений на локальных барьерах, связанных с точечными дефектами и рельефом Пайерлса. Понижая величину последнего наложением магнитного поля, можно привести дислокации в движение. Однако подобный механизм может быть применим для ионных и ковалентных кристаллов, в металлах же высота барьеров типа Пайерлса—Набарро невелика и величина активационного объема для них на несколько порядков меньше, чем для потенциальных барьеров, создаваемых другими дислокациями и точечными дефектами [14].

Таким образом очевидно, что к настоящему времени не существует универсального механизма, однозначно описывающего влияние электромагнитных полей на деформационные процессы в кристаллах. По мнению авторов, рассмотрение наиболее вероятных механизмов влияния электромагнитных полей на пластическую деформацию металлов следует проводить с учетом состояния поверхности кристалла, так как возбуждение электронной подсистемы кристалла электромагнитным полем приводит к изменению его поверхностной энергии. При деформационных процессах движущиеся дислокации, взаимодействуя со свободной поверхностью, приобретают избыточную свободную энергию, становятся неустойчивыми и стремятся выйти на поверхность кристалла [15]. Краевая дислокация притягивается к поверхности силой «зеркального изображения», которая определяется медленно меняющимся логарифмическим потенциалом. Вместе с тем выход дислокации на поверхность сопровождается появлением характерной ступеньки. При этом на создание новой ячейки затрачивается энергия  $b^2 \gamma$ , где  $\gamma$  — поверхностная энергия. Эта сила распределяется в глубь кристалла на полуширину дислокации порядка нескольких  $b$  и в непосредственной близости от поверхности может преобладать над силой «зеркального изображения». Поэтому уменьшение поверхностной энергии металла облегчит выход дислокаций одного знака на поверхность и приведет к увеличению скорости пластической деформации и уменьшению деформационного наклепа. В то же время увеличение поверхностной энергии интенсифицирует работу поверхностных источников дислокаций за счет компенсации силы «зеркального изображения».

Проблема влияния поверхностного слоя твердых тел, в частности металлов, на их механические и физические свойства в настоящее время является одной из наиболее актуальных и сложных в физике твердого тела и имеет большое прикладное значение. Например, в [16] выяснено, что, удаляя тонкий наклепанный поверхностный слой посредством электрополировки, можно добиться снижения усилий деформирования и более чем в 6 раз увеличить относительное сужение, достигаемое при разрушении монокристаллического вольфрама.

В случае металлов, полуметаллов и полупроводников изменение поверхностной энергии может быть достигнуто в результате создания в кристалле поля Холла при одновременном наложении во взаимоперпендикулярных направлениях электрического и магнитного полей. Экспе-

риментальная проверка роли поверхности и ее вклада в механизм электронно-пластической деформации проводилась на монокристаллах висмута технической чистоты. Изучалось влияние суперпозиции электрического и магнитного полей при пластической деформации двойникованием. Экспериментальная установка позволяла накладывать электрические и магнитные поля к образцу во взаимоперпендикулярных направлениях при одновременном деформировании плоскости спайности кристалла алмазным индентором.

Проведенные исследования показали, что диагонали отпечатка, длина двойниковых лучей и ширина их у устья, число двойников и сдвоенкованный объем при плотности тока в 20 А/мм<sup>2</sup> и магнитной индукции в 0,2 Тл соответствуют «классическому» электропластическому эффекту, наблюдаемому в [1] при плотности тока в 1000 А/мм<sup>2</sup>. Очевидно, что в данном случае плотность электромагнитной энергии в образце меньше на 3—4 порядка. Указанный эффект имеет полярный характер в зависимости от ориентации вектора Холла по отношению к «индентуемой» поверхности.

Полученные результаты позволяют рассматривать механизмы воздействия электромагнитными полями на электропластическую деформацию с учетом поверхностного состояния и открывают возможность управления процессами пластической деформации с помощью немеханических сил при обработке металлов давлением.

1. Савенко В. С., Спицын В. И., Троицкий О. А. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 5. С. 1181.
2. Троицкий О. А., Савенко В. С. и др. // Изв. АН СССР. 1986. Сер. Металлы. № 5. С. 97.
3. Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М., 1985.
4. Спицын В. И., Троицкий О. А. // Докл. АН СССР. 1975. Т. 220. № 5. С. 1070.
5. Троицкий О. А. // Там же. 1980. Т. 251. С. 400.
6. Фикс В. Б. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. С. 1539.
7. Рощупкин А. М., Батаронов И. Л. // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1990. № 10. С. 75.
8. Кравченко В. Я. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. С. 1676.
9. Roshchupkin A. M., Bataronov I. L., Troitski O. A., Moiseenko M. M. // Physica status solidi (b). 1989. V. 151. № 1. P. 121.
10. Brown R. A. // Phys. Rev. 1966. V. 141. № 2. P. 568.
11. Urit G. P., Varshenya S. A., Spalvin I. P. // Physica status solidi. 1966. V. 15. № 617. P. 617.
12. Альшиц В. И. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 2. С. 467.
13. Там же. 1992. Т. 34. Вып. 1. С. 155.
14. Савенко В. С., Пинчук А. И. // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1992. № 1. С. 93.
15. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М., 1962.
16. Баранов Ю. И., Березин А. В. // Машиноведение. 1988. № 2. С. 28.

Поступила в редакцию 03.10.94.

УДК 537. 312.62

В. К. КСЕНЕВИЧ, В. А. ДОРОСИНЕЦ,  
Л. В. ГОВОР, И. Б. БУТЫЛИНА

## ДВИЖЕНИЕ ВИХРЕЙ В ДЖОЗЕФСОНОВСКОЙ СРЕДЕ ПЛЕНОК $Y_1Ba_2Cu_3O_x$

The model of the Josephson junction array for studying of the current percolation mechanism in granulated films of the high temperature superconductors of  $Y_1Ba_2Cu_3O_x$  has been used. The type of the fluxon penetrated in the film and features of their motion and interaction have been defined from the type of IV-characteristics and dependencies of the critical current on magnetic field.

К синергетическим явлениям в сверхпроводниках относятся явления, связанные с проникновением, движением и взаимодействием магнитных вихрей, несущих квант магнитного потока  $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб. Процессы в двухмерной сети джозефсоновских переходов описываются системой уравнений синус-Гордона для пространственной и временной зависимо-