

ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

УДК 534.8:535.5

В. С. Савенко

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТЬ ДВОЙНИКУЮЩИХСЯ МЕТАЛЛОВ

Установлены и проанализированы физические модели новых каналов реализации двойникового. Показано, что возбуждение двойникового в области двойниковых границ приводит к интенсивному размножению двойникоуших дислокаций и коллективному взаимодействию винтовых составляющих двойникоуших дислокаций с препятствием, что открывает новые каналы реализации двойникового.

Введение

Основными видами пластической деформации кристаллических тел являются скольжение и двойникование. Несмотря на то, что двойникование относится к основным видам деформирования кристаллов, в отличие от скольжения, данный вид пластической деформации изучен недостаточно полно, в то же время экспериментальные результаты по изучению двойникового подтверждаются открытием все новых явлений, протекающих при данном виде деформации [1]–[4].

В настоящее время внимание многих исследователей обращено на рассмотрение дислокационных механизмов при модификации физических свойств кристаллов. Это вызвано тем, что у подавляющего большинства материалов пластические свойства реализуются путем эволюции в них совокупностей дислокаций. В то же время имеется ряд материалов, таких, как, например, альфа-железо, кремнистое железо, цинк, бериллий и т. д., пластическая деформация в которых протекает путем реализации процесса двойникового.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация двойникового осуществляется в случае ориентационного запрета для обычного дислокационного скольжения, а также при больших скоростях нагружения и при низких температурах. Источниками генерирования двойникоуших дислокаций являются концентраторы напряжений, а развитие двойников осуществляется с большими скоростями, и последующие деформационные процессы на границах двойников часто приводят к разрушению материала. В связи с этим управление кинетикой контролируемого двойникового, для создания равномерной дислокационной структуры на границах двойников с целью снижения концентрации напряжений, предоставляет реальную возможность использовать двойникование как резерв повышения пластичности материала. С другой стороны, системы тонких двойников при последующей деформации будут создавать естественные препятствия для полных дислокаций, в связи с этим созданием в материале двойниковой структуры возможно эффективное упрочнение материала, что является самостоятельным способом и каналом упрочнения двойникоушихся металлов.

Электропластический эффект (ЭПЭ) обнаружен при действии одиночных импульсов тока плотностью $\sim 10^5$ А/см² и длительностью $\sim 10^{-4}$ сек. на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием [5]. Он проявлялся в осцилляциях деформирующего усилия скачкообразных удлинений образцов при прохождении по ним каждого импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и тепловой дилатации образцов.

Эффект не был связан с пондеромоторным пинч-действием импульсного тока, хотя следует отметить, что при определенных режимах плотности тока $j = 10^6$ А/см² и длительностью $\sim 10^{-4}$ сек. в образце генерируются упругие колебания кристаллической решетки по типу ультразвуковых за счет пинч-эффекта.

Электропластический эффект может действовать наряду с джоулевым эффектом в ставших уже традиционными способах обработки металлов давлением с участием электрического тока, таких как ЭКН (электроконтактный нагрев) и индукционный нагрев токами Фуко, где используется джоулевый эффект.

В работах [5]–[7] впервые наблюдались пики электропластического эффекта в виде резкого снижения сопротивления металлических кристаллов деформированию под влиянием тока высокой плотности в импульсном режиме. Эффект проявлялся в виде характерных сбросов деформирующего усилия на диаграммах растяжения или сжатия монокристаллов цинка или скачков деформации (рисунок 1). Обнаруженное явление было первоначально объяснено влиянием электрон-дислокационного взаимодействия на пластическую деформацию металла.

Однако в последующем при постановке ряда уточняющих экспериментов было показано, что изменение механических свойств кристаллов при пропускании по ним импульсов тока происходит с участием пинч-эффекта и, в меньшей мере, под влиянием теплового действия тока.

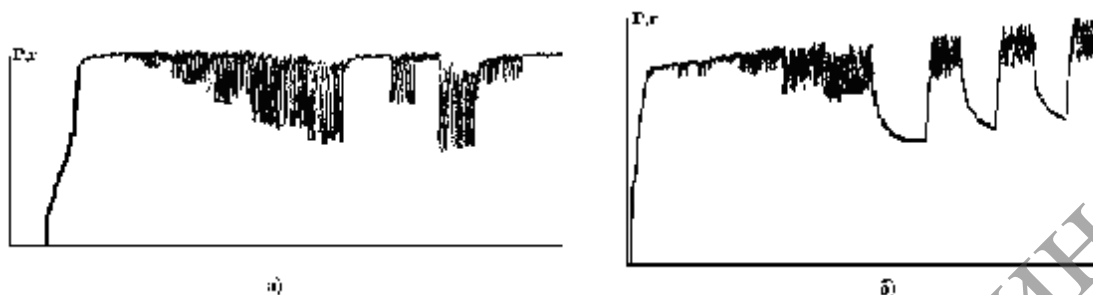
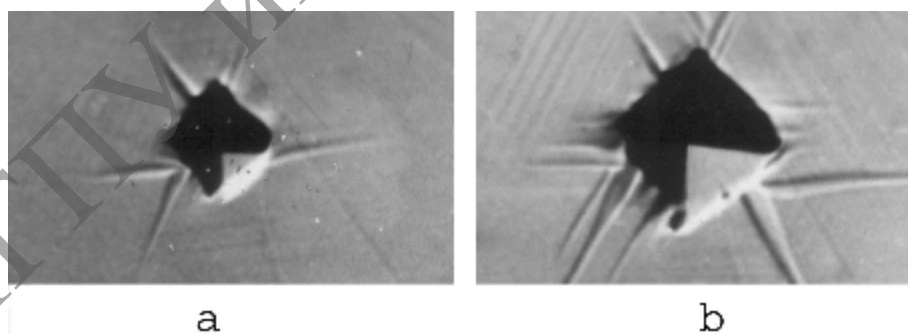


Рисунок 1 – Запись деформации кристаллов цинка с разверткой во времени изменения деформирующего усилия

Авторами [5]–[7] было установлено, что за один импульс тока величиной 1200 А/мм^2 кристаллы длиной в 15–16 мм увеличивались в длину на $3 \div 10 \text{ мкм}$. Максимальная остаточная деформация, возникающая при прохождении одной дислокации через кристалл, равна, как известно, параметру решетки $a = 2,66 \times 10^{-8} \text{ см}$, а деформация на $3 \div 10 \text{ мкм}$ в пересчете на действующий элемент скольжения кристаллов цинка $\langle 11\bar{2}0 \rangle (0001)$ соответствует выходу на поверхность кристаллов $10^4 \div 10^5$ дислокаций. Следовательно, каждый скачок деформирующего усилия был обусловлен выходом на поверхность кристалла десятков и сотен тысяч дислокаций, которые, как показали непосредственные микроскопические наблюдения, формировали свежие полосы скольжения. Таким образом, деформация кристаллов становилась в известной мере управляемой и дискретной.

При пропускании через металлические монокристаллы импульсов электрического тока с плотностью от $50\text{--}1000 \text{ А/мм}^2$ и длительностью 10^{-4} с наблюдается перераспределение деформации двойникованием в окрестностях концентраторов механических напряжений [4], [8]–[10].

Сравнение картин деформации с импульсом тока и без импульса показывает, что при совместном действии электрических и механических напряжений происходит стимулирование пластической деформации двойникованием. Увеличивается длина отдельных двойников, возникают новые двойники (рисунок 2). При сравнении были исключены все побочные факторы, которые могли бы повлиять на условия деформирования.



а – без импульса тока; б – с импульсом тока плотностью 600 А/мм^2 ;
(Нагрузка на индентор 10 г; $\times 530$)

Рисунок 2 – Деформирование кристаллов висмута сосредоточенной нагрузкой в одно и то же место

Одной из особенностей развития двойников, зарождающихся «в точке», является последовательность элементарных актов развития: при кратковременном действии нагрузки возникает тонкий двойник конечной длины, при увеличении времени действия индентора на кристалл наблюдается генерирование двойникоующих дислокаций и их трансляция по границам раздела без увеличения длины двойникового клина. Естественно, что перемещающиеся от устья к вершине двойникоующие дислокации могут встретить препятствие и образовать скопление.

При этом резко возрастает некогерентность двойниковых границ в плоскости (III) и внутренние напряжения могут привести к раскрытию трещин во вторичной плоскости спайности.

При пропускании импульса тока через кристалл во время деформации наблюдается новый вид взаимодействия винтовых двойникующих дислокаций с препятствием. Возбуждение электронной подсистемы образца приводит к интенсивному размножению двойникующих дислокаций на границах раздела и коллективному взаимодействию винтовых составляющих двойникующих дислокаций с препятствием. В результате возникает не наблюдавшееся ранее явление ветвления двойников [11]–[12].

В отсутствие внешних энергетических воздействий «ветвящиеся» двойники чаще зарождаются на двойниковых границах с малой степенью когерентности (рисунок 3). Искривление двойниковых границ вызвано избыточной концентрацией на них двойникующих дислокаций. Повышенная плотность дислокаций на двойниковой границе ведет к локализации на ней внутренних напряжений, источниками которых являются двойникующие дислокации. При этом в местах скопления дислокаций могут возникать напряжения, сравнимые по величине с порогом возникновения клиновидного двойника. Релаксация данных напряжений происходит через зарождение на двойниковой границе нового двойника, который развивается в новом энергетически выгодном направлении (рисунок 3).

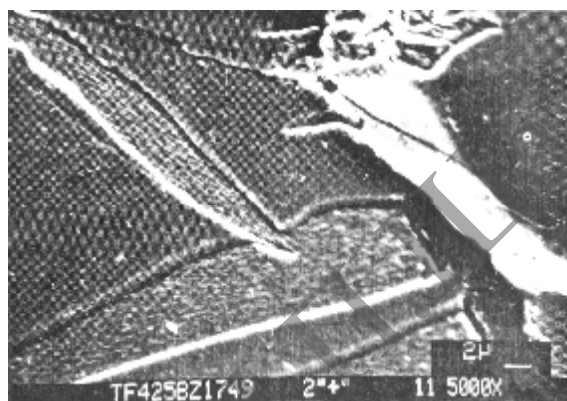


Рисунок 3 – Зарождение двойника на двойниковой границе с малой степенью когерентности

Отметим, что в монокристалле висмута при деформировании плоскости спайности (111) сосредоточенной нагрузкой двойники могут развиваться в трех направлениях $[101]$, $[\bar{1}01]$, $[10\bar{1}]$ (фактор Шмидта 0.48). Поэтому если «материнский» двойник развивался в направлении $[101]$, то «дочерний» двойник может развиваться только в направлении $[\bar{1}01]$ или $[10\bar{1}]$.

Причиной избыточной концентрации частичных двойникующих дислокаций на определенных участках двойниковых границ могут служить стопоры в виде неоднородностей структуры кристаллической решетки либо в виде скопления полных дислокаций (рисунок 4). В последнем случае «дочерний» двойник может возникать в результате расщепления полных дислокаций на частичные двойникующие.

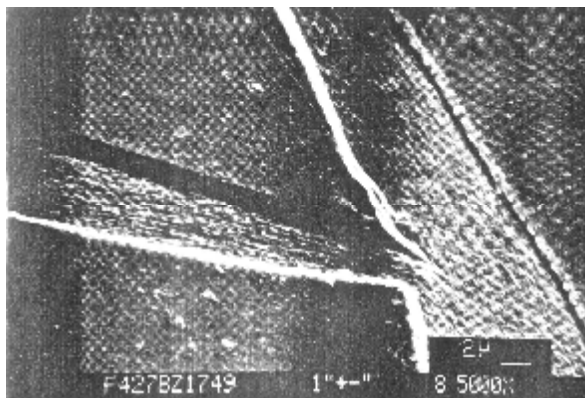


Рисунок 4 – Ветвление двойника у стопора

На рисунке 5 показан случай, когда ветвление двойника произошло в результате наличия препятствия на пути трансляции двойникоующих дислокаций. Об этом свидетельствует закругленная вершина двойника. Для объяснения данного случая воспользуемся картиной полей напряжений у клиновидного двойника (рисунок 6), которая получена в предположении того, что двойниковая граница состоит из полных, а не из частичных дислокаций. Поля напряжений вокруг скопления таких дислокаций, имеющего вид клина, можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{xy} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=1}^{N_1} \frac{(x+nd)[(x+nd)^2 - (y+nh)^2]}{[(x+nd)^2 + (y+nh)^2]^2} + \sum_{n=1}^{N_2} \frac{(x+nd)[(x+nd)^2 - (y-nh)^2]}{[(x+nd)^2 + (y-nh)^2]^2} \right\},$$

где σ_{xy} – скалывающие напряжения,

b – модуль вектора Бюргерса,

G – модуль сдвига,

ν – коэффициент Пуассона,

n – индекс суммирования,

N_1 и N_2 – число дислокаций на двойниковых границах.

В нашем случае при компьютерном построении кривых, представленных на рисунке 6, было принято $N_1 = N_2 = 10$.

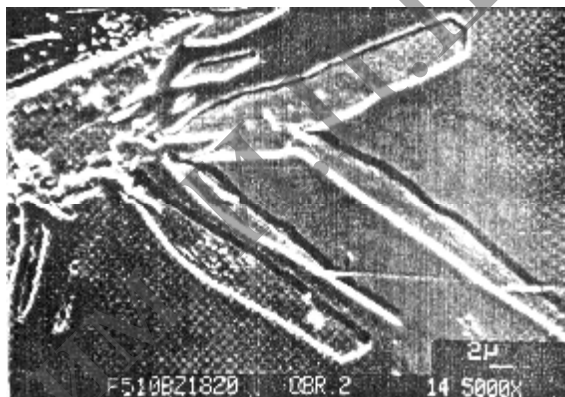


Рисунок 5 – Ветвление двойника в результате наличия препятствия на пути трансляции двойникоующих дислокаций

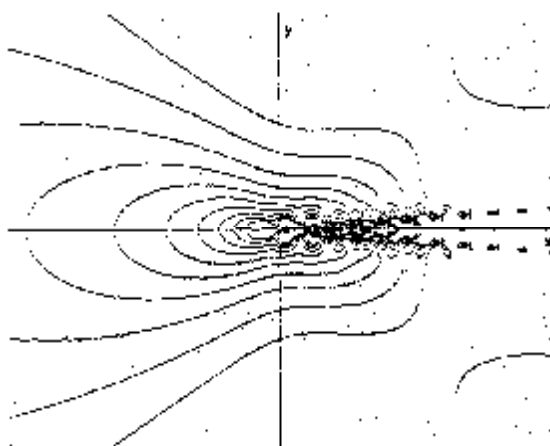


Рисунок 6 – Поля напряжений у клиновидного двойника

На рисунке 6 видно, что напряжения увеличиваются с приближением к двойниковой границе, более того у вершины двойника они имеют такой же порядок, что и у непосредственной близости двойниковой границы, но на расстоянии в два-три раза большем. В результате при наличии стопоров на пути движения клиновидного двойника происходит перераспределение напряжений у его вершины таким образом, что величина их проекций на новое направление двойникового становится сравнимой с пороговым значением возникновения двойника.

Описанные явления свидетельствуют о дополнительной возможности пластификации механически двойниующихся материалов при создании в процессе деформирования условий, благоприятных для размножения двойниующих дислокаций. Такие условия можно создать, пропуская через материал импульсы тока большой плотности во время деформирования. При этом релаксация внутренних напряжений, возникающих у дислокационных скоплений на границах раздела, может происходить не только за счет образования новых двойников, в результате чего увеличивается резерв пластичности и уменьшается вероятность хрупкого разрушения, но и в результате частичного раздвойникового.

Литература

1. Троицкий, О. А. Электропластическая деформация металлов / О. А. Троицкий // Письма в ЖТФ. – 1969. – № 10. – С. 18–22.
2. Okazaki, K. Электромеханический эффект в металлах / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad // Ser. Met. – 1978. – № 12. – С. 1063.
3. Okazaki, K. Электромеханический эффект в металлах / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad // Ser. Met. – 1978. – № 13. – С. 1063.
4. Савенко, В. С. Новые каналы реализации механического двойникового / В. С. Савенко // Письма в ЖТФ – 1998. – Т. 24. – № 9. – С. 43–49.
5. Савенко, В. С. Двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами бора / В. С. Савенко // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 8. – С. 1–9.
6. Savenko, V. Electroplastic effect under the simultaneous superposition of electric and magnetic fields / V. Savenko // Journal of applied physics. – 1999. – № 5. – P. 1–4.
7. Савенко, В. С. Двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами углерода / В. С. Савенко, О. М. Остриков // Весці НАН Беларусі. Сер. фізико-математических наук. – 1998. – № 2 (деп. № 35 В98).
8. Савенко, В. С. Распределение примесей у двойниковой границы / В. С. Савенко, О. М. Остриков, В. В. Углов // Весці НАН Беларусі. Сер. фізико-математических наук. – 1998. – № 2 (деп № 33 В98).
9. Savenko, V. Plastification of Bismuth Crystal under Simultaneous Superposition of Electric and Magnetic Fields / V. Savenko // Zeitschrift für METALLKUNDE. – Munchen. – 1998. – № 7. – P. 498–500.
10. Савенко, В. С. К вопросу о двойниковании монокристаллов висмута, облученных ионами циркония / В. С. Савенко, О. М. Остриков, В. В. Углов // Металлы. – 1999. – № 4. – С. 115–118.
11. Савенко, В. С. Эволюция ансамблей клиновидных двойников в монокристаллах висмута, облученных ионами углерода и циркония / В. С. Савенко, О. М. Остриков, В. В. Углов // Кристаллография. – 1999. – Т. 44. – № 6. – С. 1–6.
12. Савенко, В. С. Механическое двойникование металлов в условиях внешних энергетических воздействий / В. С. Савенко. – Минск : «Технопринт», 2000. – 218 с.
13. Савенко, В. С. Электропластичность двойниующихся материалов / В. С. Савенко // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 114–118.
14. Савенко, В. С. Упрочнение при электропластической деформации кристалла висмута / В. С. Савенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 3. – С. 54–56.

Summary

Processing of metals by pressure has wide application in the industry and is based on use of characteristic for metals of plasticity property. Plasticity of a material is one of the major characteristics in manufacturing wires from copper, aluminum, tungsten.

Поступила в редакцию 04.02.09.