

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ АЛЮМИНИЯ ПРИ 4,2К

*В.И.Гостищев, Р.А.Глиник, М.Л.Петровский,
В.Н.Хазов*

Оценена величина скорости быстрых дислокаций в алюминии в процессе пластической деформации. Метод основан на предсказанной В.Я.Кравченко зависимости электронного торможения от напряженности магнитного поля. Линейная зависимость скорости от σ при малых деформациях переходит в квадратичную к моменту разрушения.

Характер пластической деформации в металлах при гелиевых температурах подвержен существенному влиянию электронов проводимости. Для быстрых дислокаций, движущихся при приложении нагрузки $\sigma > \sigma_0$ (σ_0 – предел текучести) надбарьерно, это влияние проявля-

ется через силу электронного торможения $F = B_0 V$ (V — скорость дислокации, коэффициент электронного торможения B_0 вычислен в [1]). В сильном магнитном поле ($\omega_H \tau \gg 1$, где ω_H — циклотронная частота, τ — время свободного пробега носителей тока) как показала Кравченко в [2] должно происходить увеличение электронного торможения: $B_H = B_0 \omega_H \tau$ для малых скоростей движения дислокаций ($V \ll b/\tau$) и $B_H = B_0 \omega_H \tau \frac{b}{V\tau} \ln \frac{V\tau}{b}$ для больших скоростей ($V \gg b/\tau$), где b — вектор Бюргера.

Если в какой-то момент активной деформации остановить испытательную машину и поместить деформируемый кристалл в сильное магнитное поле H , полагая, что за время с момента остановки до наложения H не произошло размножение дислокаций, то должен возникнуть скачок напряжения $\Delta\sigma_H = \sigma_H - \sigma$, обусловленный изменением силы торможения:

$$b\Delta\sigma_H = V(B_H - B_0). \quad (1)$$

Остановка машины должна быть кратковременной с тем, чтобы не произошло заметной релаксации напряжения $\Delta\sigma_p$. При определении величины скачка $\Delta\sigma_H$ должна учитываться и $\Delta\sigma_p$.

Эксперимент проводился при температуре жидкого гелия в продольном магнитном поле напряженностью до 50 кЭ. В качестве объекта исследования был взят алюминий с содержанием не менее 99,999% Al. Этим выбором было обеспечено $\omega_H \tau \gg 1$ перед началом деформирования. Образцы приготавливались холодным волочением с обжатием $\ln(L/L_{исх}) \approx 2$ ($L_{исх}$ — длина заготовки, L — длина после волочения), головки под захваты прессовались в матрице. Рабочая часть образцов — цилиндр длиной 15 мм и диаметром 3 мм, искаженный слой с его поверхности стравливался, после чего проводилось электрополирование. Образцы отжигались при $T = 400^\circ\text{C}$ в течение 6 часов. Высокотемпературный отжиг сильно деформированного алюминия снизил размер зерен до $0,5 + 1,0$ мкм.

Образцы испытывались на растяжение с постоянной скоростью $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ сек $^{-1}$, задаваемой деформационной машиной, аналогичной описанной в [3]. Тяги и захваты машины были изготовлены из немагнитного и жесткого материала. Чувствительность регистрирующего прибора была не хуже $0,05$ кгс/мм 2 . Кривые деформации и электросопротивления при растяжении записывались на двухкоординатном самописце.

Исследование проводилось в области пластической деформации вплоть до момента разрушения образца. В каждом опыте H изменялась от нуля до фиксированной величины только после остановки машины, рис. 1. При $H \approx 0$ в моменты остановки в отдельных случаях наблюдалась заметная релаксация напряжения. После ввода поля машина вновь включалась, скачок напряжения $\Delta\sigma$ возникал в самом начале продолжения растяжения. Прирост $\Delta\sigma_{oH}$, обусловленный магнитным торможением, определялся как сумма $\Delta\sigma_{oH} = \Delta\sigma + \Delta\sigma_p$. При $H = \text{const}$ машина останавливалась лишь на время вывода поля, после чего вновь включалась, скачок напряжения $\Delta\sigma_{H_0}$ как и $\Delta\sigma_{oH}$ возникал в самом начале дальнейшего растяжения. При остановленной машине $\Delta\sigma_p$ в магнит-

ном поле не наблюдалась. При этом все скачки $\Delta\sigma_{\sigma_H}$, зафиксированные в разные моменты деформации, различны, $\Delta\sigma_{H_0}$ — также не одинаковы в свою очередь $\Delta\sigma_{\sigma_H} \neq \Delta\sigma_{H_0}$. То, что скачки $\Delta\sigma_{\sigma_H}$ и $\Delta\sigma_{H_0}$ возникали не в моменты ввода и вывода H , а в процессе растяжения при различных параметрах внешнего воздействия, т. е. при $H = 0$ или $H = \text{const}$ свидетельствуют в пользу того, что наблюдаемый эффект связан с изменениями прочности алюминия. Кроме того, ставился проверочный эксперимент: в тех же условиях, т. е. при $T = 4,2\text{К}$ и $H = 0$ и 51 кЭ , была записана кривая деформации растяжением алюминия технической чистоты ($\omega_H \tau \ll 1$). Никаких изменений в кривой деформации не наблюдалось. Включение H без остановки машины тоже ведет к упрочению, но $\Delta\sigma_H$ проявляется не четко, так как оказывается растянутым вдоль оси абсцисс соответственно времени ввода поля.

Время свободного пробега носителей тока в исходном алюминии было оценено методом размерного эффекта [4], оно оказалось равным $\tau \approx 6 \cdot 10^{-10}$ сек. В процессе деформации изменение τ оценивалось по величине электропроводности, рис. 1. Как видно при относительной деформации порядка $\epsilon = 10 - 14\%$ наблюдается уменьшение электропроводности ρ , на отдельных образцах оно падало до остаточного. Факт уменьшения ρ при растяжении заслуживает внимания. Известно, что поликристалл с мелким зерном квазиизотропен. В процессе деформации квазиизотропность может исчезать, изменение формы самого образца приводит к изменению взаимных ориентировок кристаллитов. О повороте кристаллитов в нашем эксперименте прямым образом свидетельствует то, что на некоторых участках рабочей части деформированных образцов диаметр становился больше, чем до растяжения. В алюминии направлением предпочтительного ориентирования является $- [111]$. Степень предпочтительной ориентировки определяется величиной деформации. Наряду с развитием текстуры, приводящей к увеличению проводимости вдоль волокон [5], развиваются процессы поперечного скольжения, сопровождающиеся ростом электросопротивления. Развитие этих противоборствующих процессов происходит при различных величинах ϵ , чем и объясняется ход кривой.

Условие сильного поля при $H = 50\text{ кЭ}$ и $T = 4,2\text{К}$ ослабевает при $\epsilon = 35 - 40\%$ и перестает выполняться лишь в третьей стадии деформации. По величине скачка напряжения $\Delta\sigma_H$ и времени свободного пробега носителей тока τ , определяемых в какой-то момент пластической деформации экспериментально, в соответствии с (1) можно вычислить среднюю скорость дислокаций. Значения скорости дислокаций, определяемых по величинам скачков $\Delta\sigma_{\sigma_H}$ и $\Delta\sigma_{H_0}$ изображены на рис. 2. Одной из возможных причин того, что $\Delta\sigma_{\sigma_H} \neq \Delta\sigma_{H_0}$ может быть различие скоростей дислокаций в реальных кристаллах в различные моменты пластической деформации. По-видимому, это связано с наличием в алюминии множественности систем скольжения и неодновременности их действия, каждая из систем имеет свои, отличные от других значения дислокационной плотности и скорости. Порядок величины скорости и линейность ее зависимости от приложенного напряжения при не слишком больших деформациях хорошо совпадают с результатами, полученными другими методами, например [6]. Это дает основание считать, что используемая интерпретация эффекта справедлива. Погрешность

определения подвижности по нашим оценкам не превышает $\pm 15\%$. Как видно из рис. 2, с ростом σ зависимость скорости от приложенного напряжения значительно возрастает и из линейной переходит в квадратичную.

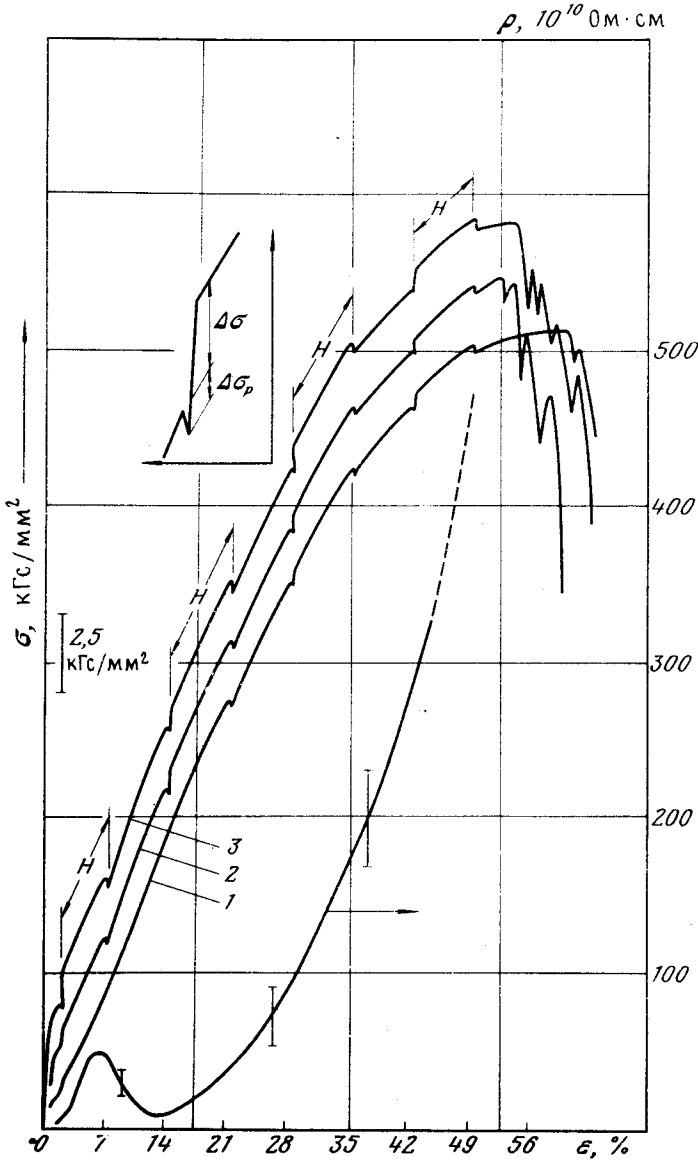


Рис.1. Кривые деформации алюминия при многократном вводе и выводе магнитного поля H . Кривые сняты: 1 — при $H = 0$ и $H = 20 \text{ кэ}$, 2 — 0 и 40 кэ и 3 — 0 и 51 кэ . Интервал деформации в магнитном поле обозначен H . На вставке — форма скачка упрочнения $\Delta\sigma_{\text{оН}} = \Delta\sigma + \Delta\sigma_p$. Кривые 1 и 2 опущены вдоль ординаты σ . Справа — зависимость электросопротивления от степени деформации

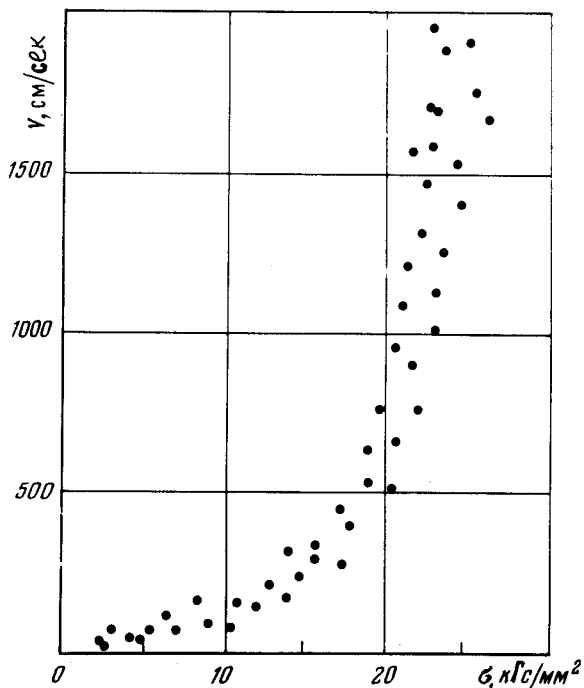


Рис.2. Зависимость скорости быстрых дислокаций в алюминии от приложенного напряжения при $T = 4,2\text{ K}$

В наших экспериментах поток дислокаций $NV = \dot{\epsilon} / b \sim 10^2 - 10^3 (\text{см}\cdot\text{сек})^{-1}$. Поэтому с большими скоростями, приведенными на рис. 2, движутся лишь отдельные быстрые дислокации ($N \sim 1 - 10 \text{ см}^2$). Как показано в [7] влияние магнитного поля испытывают лишь дислокации параллельные H . При нашей геометрии таковыми, по-видимому, являются участки дислокационных петель; в среднем их плотность может соответствовать приведенной ранее.

В заключение авторы выражают глубокую признательность В.Я.Кравченко за полезные обсуждения полученных результатов и ценные замечания.

Институт физики твердого тела
и полупроводников
Академии наук Белорусской ССР

Поступила в редакцию
30 апреля 1979 г.
После переработки
4 июня 1979 г.

Литература

- [1] В.Я.Кравченко. ФТТ, 8, 927, 1966.
- [2] В.Я.Кравченко. Письма в ЖЭТФ, 12, 551, 1970.
- [3] В.В.Пустовалов, Г.С.Медько, В.С.Миронов-Копысов, Н.И.Мокрый. ПТЭ, №7, 176, 1967.
- [4] Б.Н.Александров. ЖЭТФ, 2, 399, 1962.
- [5] R.Bakish, S.K.Fenster, A.Kambouroglou, J.Appl.Phys., 39, 4473, 1968.
- [6] V.R.Parameswaran, N.Vrabe, J.Weetzman. J.Appl. Phys., 43, 2982, 1972.
- [7] А.М.Гришин, Э.А.Канер, Э.П.Фельдман. ЖЭТФ, 70, 1445, 1976.