

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ

В.П.Лебедев, В.С.Крыловский

Показано, что низкотемпературная деформация в магнитном поле монокристалла высокочистого алюминия приводит к дополнительному увеличению удельного электросопротивления по сравнению с нагружением в $H = 0$.

Согласно имеющимся экспериментальным данным ¹⁻³ низкотемпературная деформация алюминия в постоянном магнитном поле H сопровождается увеличением силы электронного торможения движущейся дислокации. При этом возрастание деформирующего напряжения связывается с изменением динамики дислокации в предположении постоянства дефектной структуры кристалла.

В связи с этим представляло интерес рассмотрение воздействия сильного H ($\omega \tau_p \gg 1$, ω – циклотронная частота, τ_p – время релаксации электрона) на формирование структурных искажений в процессе пластического течения металла. В качестве структурночувствительной характеристики было выбрано удельное электросопротивление ρ .

В настоящей работе описано явление более интенсивного возрастания удельного электросопротивления монокристаллов алюминия за счет деформации в постоянном магнитном поле до 60 кЭ по сравнению с нагружением в $H = 0$; а также рассмотрено влияние на это явление некоторых параметров эксперимента.

Монокристаллы алюминия одной ориентации ($2 \times 2 \times 20 \text{ мм}^3$) чистотой 99,9999% и отношением $R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}} = 2,5 \cdot 10^4$ деформировали со скоростью $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (чувствительность регистрации напряжения $\pm 2 \text{ Г/мм}^2$, а деформации $\pm 0,02\%$) при 4,2К в $H = 0$ и постоянном относительно оси растяжения магнитном поле (неоднородность H на длине образца не превышала $\pm 1\%$). Электросопротивление измеряли по четырехточечной методике с чувствительностью $4 \cdot 10^{-11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 4,2К в $H = 0$ при отсутствии нагрузки на образце.

Как видно из рис. 1, а, прирост удельного электросопротивления $\Delta\rho = \rho_\epsilon - \rho_0$ (ρ_0 и ρ_ϵ – относятся соответственно к состоянию металла до и после нагружения) монокристаллов алюминия одной ориентации после деформации ϵ в $H = 20$ (2), 40 (3) и 60 (4) кЭ выше, чем в $H = 0$ (1). Различие между $\Delta\rho(H)$ и $\Delta\rho(0)$ возникает уже при $\epsilon \cong 0,2-0,3\%$, достигает максимального значения и далее убывает до нуля (рис. 1, б). С ростом H положение максимума и предельное значение ϵ , начиная с которого $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0) = 0$, смещаются в область больших относительных удлинений.

При этом участок роста $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)$ от ϵ соответствует стадии легкого скольжения на кривой деформационного упрочнения $\tau(\epsilon)$, показанной в нижней части рис. 1, а (в приведенном масштабе изменение сдвигового напряжения в $H \neq 0$ не фиксируется), а положение максимума соответствует переходу к стадии линейного упрочнения.

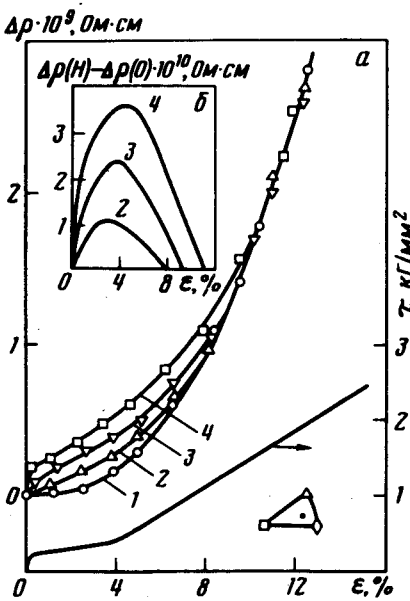


Рис. 1

Для $H = 60$ кЭ и $\epsilon = 4\%$ отношение $\Delta\rho(H) / \Delta\rho(0) = 2,8$, что соответствует снижению величины отношения $R_{300\text{K}} / R_{4,2\text{K}}$ от $8,8 \cdot 10^3$ до $3,1 \cdot 10^3$.

В исследованном интервале магнитных полей предельная деформация, после которой различие в приросте ρ не наблюдается, характеризуется условием $\omega \tau_p \cong 10$ (для алюминия время релаксации может быть определено из соотношения $3, \tau_p = AR(\epsilon)_{300\text{K}} / V_F \rho_{300\text{K}} R(\epsilon)_{4,2\text{K}}$, где $A = 5,5 \cdot 10^{-12}$ Ом·см, $V_F = 2 \cdot 10^8$ см/с, $\rho_{300\text{K}}$ — удельное сопротивление при 300К, а $R(\epsilon)_{4,2\text{K}}$ и $R(\epsilon)_{300\text{K}}$ — сопротивление деформированного металла при температуре испытания и комнатной).

Поскольку в отсутствии внешних напряжений $\rho(\epsilon, H)$ определяется интегральной плотностью структурных искажений, возникающих в кристалле в процессе пластического течения, то и различие между $\Delta\rho(H)$ и $\Delta\rho(0)$ необходимо рассматривать с точки зрения изменения концентрации точечных и линейных дефектов.

При этом изменение энергии образования дефекта, вероятно, можно не учитывать в виду незначительного влияния магнитного поля на упругие модули металла⁴.

В предположении равноценного вклада в удельное электросопротивление точечных и линейных дефектов оценим возможное возрастание сдвигового напряжения $\Delta\tau$ при введении в кристалл дополнительного количества дислокаций ΔN^5

$$\Delta\tau = aGb[\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)/2\rho_d]^{1/2} \sim 100 \text{ Г/мм}^2, \quad (1)$$

где $a = 0,5$; модуль сдвига $G = 2,5 \cdot 10^3$ кГ/мм², вектор Бюргера $b = 2,86 \cdot 10^{-8}$ см и электросопротивление единицы плотности дислокаций $\rho_d = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Ом·см³. Поскольку различие в сдвиговом напряжении при $H \neq 0$ и $H = 0$ на пределе текучести не превышает ~ 10 Г/мм² (рис. 2) и на стадии легкого скольжения существенно не изменяется, то можно считать, что $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0) \neq 0$ в основном обусловлено избыточной концентрацией точечных дефектов.

Источником повышенной концентрации этого сорта дефектов могут служить подвижные дислокации, увеличение относительной плотности которых в $H \neq 0$ согласно⁶ может быть представлено в виде

$$\frac{N_n(H)}{N_n(0)} \cong 1 + \Theta \epsilon \frac{\delta\tau(H)}{\tau^2}, \quad (2)$$

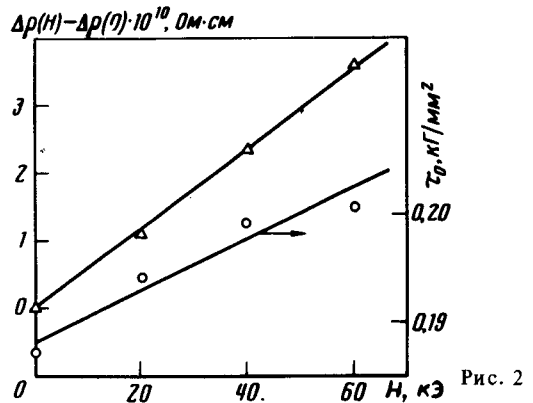


Рис. 2

Рис. 1. Изменение сдвигового напряжения τ и прироста удельного электросопротивления $\Delta\rho$ (а); величины $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)$ (б) от степени деформации ϵ для H , кЭ: 1 — 0, 2 — 20, 3 — 40 и 4 — 60

Рис. 2. Зависимость $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)$ и предела текучести τ_0 от H

где Θ — коэффициент деформационного упрочнения, $\delta\tau(H)$ — прирост сдвигового напряжения в магнитном поле благодаря возрастанию вязкости электронной подсистемы.

Качественное согласие экспериментальных данных с соотношением (2) иллюстрируют зависимости $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)$ для $\epsilon = 4\%$ и предела текучести τ_0 от напряженности магнитного поля (рис. 2). Возрастание τ_0 (можно полагать и $\delta\tau(H)$ вблизи предела текучести) по линейному закону от H способствует увеличению доли подвижных дислокаций, генерирующих при своем движении дополнительное количество точечных дефектов, что в свою очередь приводит к изменению $\Delta\rho(H) - \Delta\rho(0)$ также пропорционально H .

Литература

1. Galligan J.M., Lin T.H., Pang C.S. Phys. Rev. Lett., 1977, 38, 405.
2. Гостищев В.И., Глинник Р.А., Петровский М.Л., Хазов В.И. Письма в ЖЭТФ, 1977, 30, 102.
3. Крыловский В.С., Лебедев В.П., Хоткевич В.И. ФНТ, 1981, 7, 1550.
4. Алерс Дж. В кн.: Физическая акустика. М.: Мир, 1969, IV-A, 327.
5. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967.
6. Siegel E. Phys. stat. sol. (a), 1971, 5, 607.

Харьковский государственный
университет им. А.М.Горького

Поступила в редакцию
28 апреля 1982 г.