

Влияние циклической смены нормального и сверхпроводящего состояний на деформацию сплавов Pb–In

В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, В. М. Пинто Симоес

Харьковский государственный университет, Украина, 310077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: vladimir.s.krylovskiy@univer.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 2 апреля 1997 г., после переработки 7 мая 1997 г.

Установлено упрочняющее действие циклической смены нормального и сверхпроводящего состояний на монокристаллы сплавов системы Pb–In. Возрастание деформирующего напряжения металла при таком воздействии связывается с увеличением плотности деформационных дефектов

Встановлено зміцнюючу дію циклічної зміни нормального та надпровідного станів на монокристали сплавів системи Pb–In. Зростання деформуючого напруження металу при такому впливі пов'язується із збільшенням густини деформаційних дефектів.

PACS: 83.50.Pk

Перестройка электронного энергетического спектра при сверхпроводящем переходе приводит к уменьшению силы электронного торможения движущихся дислокаций [1] с одновременным увеличением интенсивности генерации структурных дефектов [2], что приводит к более сильному деформационному упрочнению металла в сверхпроводящем состоянии [3]. Для наблюдения изменений силы электронного торможения дислокаций в зависимости от условий эксперимента и состояния объекта обычно используют циклическую смену нормального и сверхпроводящего состояний в процессе активного нагружения, ползучести или релаксации напряжений одного и того же образца [1].

Наличие динамических процессов, связанных с многократными переходами электронной подсистемы, включением-выключением внешнего магнитного поля, периодическими скачками механического напряжения и т.п., также может оказать влияние на прочностные и пластические характеристики металла. В пользу этого свидетельствуют выводы работы [4] о том, что деформирование металла с многократными изменениями сверхпроводящего и нормального состояний, последующей разгрузкой и отжигом

приводит к созданию дефектной структуры, обладающей пониженным возвратом и повышенным упрочнением при температуре выше критической T_c . В связи с этим целью настоящей работы было выявление закономерностей деформирования металла в условиях циклической смены нормального и сверхпроводящего состояний при температуре испытаний $T < T_c$.

Объектами исследований служили монокристаллы сплавов Pb– x ат.% In ($x = 0-5$) с чистотой исходных компонентов: Pb — 99,9992% и In — 99,999%. Образцы в виде плоскопараллельных пластин $1 \times 5 \times 30$ мм деформировали растяжением при 4,2 К со скоростью $1,5 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$. Погрешность в определении напряжения составляла $\pm 2 \cdot 10^4$ Па, а деформации — $\pm 0,1\%$. Смену нормального и сверхпроводящего состояний с частотой 2 цикла на 1% относительного удлинения осуществляли с помощью магнитного поля с индукцией $B = 2$ Тл. Остаточное сопротивление металла в нормальном состоянии измеряли по четырехточечной методике с чувствительностью $4 \cdot 10^{-13}$ Ом·м.

Циклически меняющееся механическое напряжение на образце при 77 К создавали магнитострикционным изменением длины

никелевой пластины (100 мм) в цепи нагружающего устройства.

Общей закономерностью проведенных экспериментов было наличие у монокристаллов свинца и его сплавов с индием более высокого уровня сдвигового напряжения τ_c (сглаженная кривая сдвиговое напряжение — деформация $\tau(\gamma)$ проводилась по напряжению в нормальном состоянии) при деформации с циклической сменой нормального и сверхпроводящего состояний по сравнению с уровнем напряжения τ_n при деформации только в нормальном состоянии. Поскольку циклирование состояний начинали еще в упругой области нагрузок, всегда наблюдали более высокий предел текучести по сравнению с пределом текучести в нормальном состоянии.

На рис. 1 приведены кривые упрочнения $\tau(\gamma)$ для монокристаллов сплава Pb—5 ат.% In с одинаковой ориентацией (указана в нижней части рисунка), деформированных в различных режимах: 1 — нормальное и 2 — сверхпроводящее состояния; 3 — циклическая смена нормального и сверхпроводящего состояний. Как установлено ранее [3], нагружение металла с фиксированным значением плотности нормальных электронов приводит (практически сразу же за пределом текучести) к более высокому уровню деформирующего напряжения

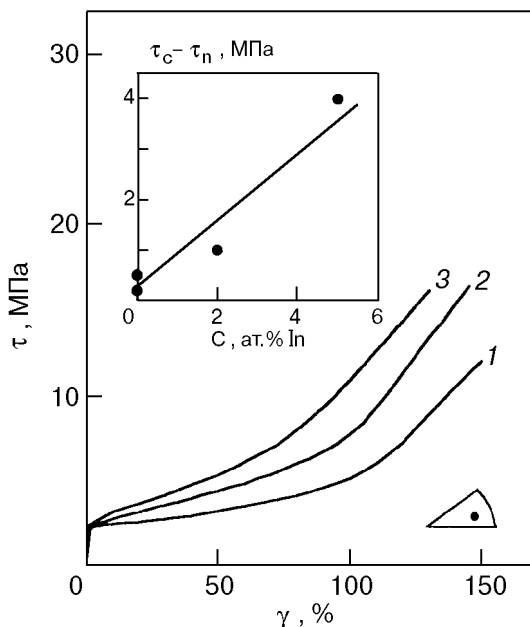


Рис. 1. Деформационные кривые $\tau(\gamma)$ монокристаллов сплава Pb—5 ат.%In, соответствующие нормальному (1) и сверхпроводящему (2) состояниям, а также циклической смене этих состояний (3). На вставке — зависимость дополнительного прироста напряжения $\tau_c - \tau_n$ от концентрации индия в сплаве ($\gamma = 75\%$).

в сверхпроводящем состоянии по сравнению с нормальным ($\tau_s > \tau_n$). В соответствии с применяемой схемой деформации с периодической сменой нормального и сверхпроводящего состояний, когда образец находится в каждом из них примерно одинаковое время, кривая 3 должна была бы располагаться между кривыми 1 и 2 (рис. 1). Однако циклическая смена состояний приводит к пластическому течению при более высоких значениях деформирующего напряжения $\tau_c > \tau_s > \tau_n$. Кроме того, на всех стадиях деформирования наблюдали для коэффициента упрочнения $\theta_c > \theta_n$, предела прочности $\tau_{bc} > \tau_{bn}$ и возрастание пластичности на $\approx 20\%$ при нагружении в нормальном состоянии. Абсолютное $\tau_c - \tau_n$ и относительное $(\tau_c - \tau_n)/\tau_n$ различия в сдвиговом напряжении монотонно увеличиваются, достигая при $\gamma \approx 125\%$ соответственно величин 0,8 МПа и 85%. Отношение $\tau_c - \tau_n$ к величине изолированного скачка напряжения $\delta\tau_{ns}$ равно 10.

Как и деформационные дефекты, примесные атомы способствуют более эффективному воздействию режима циклирования состояний на процесс упрочнения металла-сверхпроводника. На рис. 1 (вставка) показано возрастание $\tau_c - \tau_n$ по линейному закону от концентрации атомов индия в сплаве.

Итак, циклическое изменение состояния электронной системы металла вследствие сверхпроводящего перехода позволяет не только определить величину силы электронного торможения движущейся дислокации [1], но и за счет динамических процессов при смене состояний наблюдать рост деформирующего напряжения (рис. 1), превышающий увеличение сдвигового напряжения даже при деформации только в сверхпроводящем состоянии [3]. Более интенсивное протекание процессов деформационного упрочнения может быть обусловлено увеличением концентрации структурных дефектов и их распределением по объему кристалла.

Для оценки искаженности кристалла свинца (99,9992%) измеряли остаточное удельное электросопротивление ρ после нагружения в нормальном и сверхпроводящем состояниях, а также в режиме циклической смены этих состояний. Измерение ρ производили при отсутствии внешних напряжений на образце и в магнитном поле выше критического ($H > H_{c1}, H_{c2}$). Возрастание ρ с увеличением степени относительного удлинения ϵ приведено на

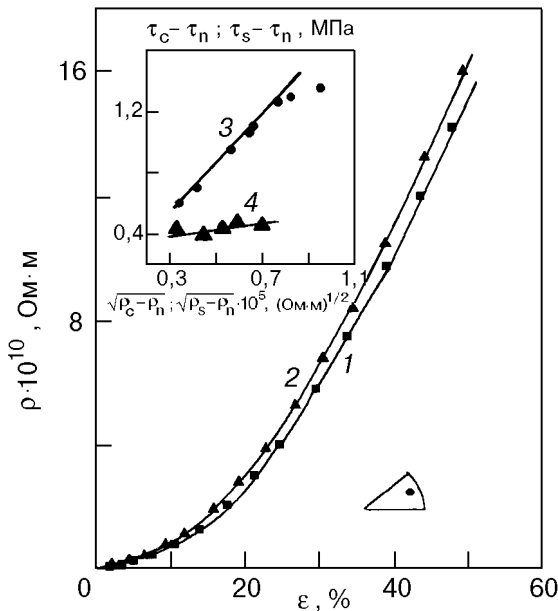


Рис. 2. Изменение электросопротивления ρ от степени относительной деформации ϵ для монокристаллов свинца (99,9992%) после нагружения в нормальном (1) и при циклической смене состояний (2). На вставке — зависимость $\tau_c - \tau_n$ от $(\rho_c - \rho_n)^{1/2}$ (3) и $\tau_s - \tau_n$ от $(\rho_s - \rho_n)^{1/2}$ (4).

рис. 2 ($\rho(\epsilon)$ для образца, деформированного в сверхпроводящем состоянии, на рисунке не показано). Для всего интервала деформаций $\rho_c > \rho_n$ и $\rho_c - \rho_n$ монотонно возрастает с увеличением ϵ . Для указанной (в нижней части рисунка) ориентации монокристалла свинца на уровне $\epsilon = 30\%$ величина $\rho_c - \rho_n = 0,62 \cdot 10^{-10}$ Ом·м и $(\rho_c - \rho_n)/\rho_n = 10\%$.

Для различных моделей структурного упрочнения следует [5] $\tau(\gamma) = \tau_0 + \alpha G b \sqrt{N_d}$, где τ_0 и $\tau(\gamma)$ — сдвиговое напряжение исходного и деформированного кристалла; $\alpha = 0,1-1$; G — модуль сдвига; N_d — плотность дислокаций. При равноценном вкладе точечных и линейных дефектов в прирост электросопротивления для свинца по приведенным зависимостям $\rho_c(\epsilon)$ и $\rho_n(\epsilon)$ (рис. 2) можно оценить величину избыточной плотности дислокаций $N_d = (\rho(\epsilon) - \rho_0)/2\rho_d$, где ρ_0 соответствует недеформированному кристаллу, а ρ_d — удельное электросопротивление дислокаций единичной плотности. Используя приведенное выше соотношение для $\tau(N_d)$, получаем линейную связь между дополнительным упрочнением ($\tau_c - \tau_n$) или ($\tau_s - \tau_n$) и величиной $(\rho_c - \rho_n)^{1/2}$ или $(\rho_s - \rho_n)^{1/2}$ (рис. 2, вставка). Различные углы наклона прямых 3 и 4 соответствуют повышению интенсивности генерации дополнительного количества деформационных дефектов и созданию более эффективной сетки препятствий структурного

характера на пути движущихся дислокаций при циклической смене состояний по сравнению со сверхпроводящим и нормальным состояниями.

Одной из возможных причин наблюдаемого воздействия циклической смены состояний может быть влияние изменения уровня механического напряжения на образце вследствие сверхпроводящего перехода (скачки напряжения $\delta\sigma_{ns}$). Для проверки этой гипотезы сплав Pb—5 ат.% In деформировали при 77 К обычным способом и в режиме циклического изменения напряжения (никелевый магнитостриктор длиной 100 мм в нагружающей цепи образца), по величине соответствующего скачку напряжения при сверхпроводящем переходе. Сопоставление полученных кривых упрочнения показало, что подача небольшого пульсирующего механического напряжения (амплитуда 0,1–0,5 МПа и частота 2 цикла на 1% относительного удлинения) на образец в процессе растяжения не приводит к возрастанию его деформирующего напряжения.

Наиболее вероятным механизмом эффекта, приводящего к увеличению концентрации деформационных дефектов и созданию структуры с повышенным сопротивлением пластическому течению, являются особенности самого процесса сверхпроводящего перехода. При этом изменение состояния электронной системы происходит через промежуточное или смешанное состояние сверхпроводника. При изменении внешнего магнитного поля в интервале $0 \leq H \leq H_c$, H_{c2} в металле возникает динамическое промежуточное или смешанное состояние с движущейся системой доменов или вихрей магнитного потока. Наличие взаимодействия границ раздела нормальной и сверхпроводящей фаз с дефектами кристаллической решетки [6,7] может способствовать более интенсивному действию дислокационных источников и созданию дислокационных структур с повышенным сопротивлением процессам пластического течения металла.

Работа выполнена при поддержке научной программой PRAXIS XXI.

1. В. И. Старцев, В. Я. Ильичев, В. В. Пустовалов, *Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах*, Металлургия, Москва (1975).
2. В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, *ФТТ* 18, 3648 (1976).
3. В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, *ФТТ* 33, 2994 (1991).
4. Д. А. Диденко, В. В. Пустовалов, *ФНТ* 1, 1428 (1975).
5. Ж. Фридель, *Дислокации*, Мир, Москва (1967).
6. В. П. Лебедев, В. И. Хоткевич, *ФНТ* 5, 89 (1979).
7. В. П. Лебедев, Ле Хак Хьеп, *ФТТ* 25, 228 (1983).

The influence of cyclic change of normal and
superconducting states on deformation of
Pb-In alloys

V. P. Lebedev, V. S. Krylovskii,
and V. M. Pinto Simoes

It is found that the cyclic change of normal and
superconducting states contributes to the strengthen-

ing of Pb-In alloys single crystals. The increase in
straining stress in this case may be due to the in-
crease in structural defects density.