

СКАЧКООБРАЗНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СПЛАВОВ Pb-(4...49) ат.% In В НОРМАЛЬНОМ И СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИЯХ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 1,65...4,2 К

В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

E-mail: victor.p.lebedev@univer.kharkov.ua

Приведены результаты измерения параметров низкотемпературной скачкообразной деформации различного масштаба сплавов Pb-(4...49) ат.% In. Скачки деформирующего напряжения малой амплитуды ~0,1 МПа и с концентрацией до ~200 наблюдаются во всем диапазоне пластического течения как в нормальном (1,65...2 К), так и в сверхпроводящем (2...4,2 К) состояниях сплавов. При деформировании сплавов в нормальном состоянии наблюдаются также скачки с амплитудой ~1 МПа и концентрацией до ~50. Обсуждаются возможные механизмы явления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей низкотемпературной деформации металлов и сплавов является возникновение неустойчивости и неоднородности пластического течения в виде аperiодических скачков нагрузки переменной амплитуды на кривой деформационного упрочнения при растяжении или сжатии в условиях активного нагружения [1]. Наряду со скачками деформирующего напряжения ~1...10 МПа, характерными для ряда чистых металлов и сплавов [1], на свинце в сверхпроводящем состоянии [2] и сплавах системы Pb-In в сверхпроводящем [3] и нормальном [4] состояниях наблюдаются скачки напряжения малой амплитуды ~ (10⁻²...10⁻¹) МПа.

В работе приводятся результаты дальнейшего изучения низкотемпературной скачкообразной деформации различного масштаба в сплавах системы Pb-In.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Объект исследования – поликристаллические (размер зерна $l_0 \sim 3 \cdot 10^{-4}$ м) сплавы Pb-(4...49) ат.% In (исходные компоненты: Pb–99,996 % и In–99,99 %).

Образцы с размерами рабочей части 2x4x15 мм деформировали растяжением со скоростью $v_{шт} = 4$ мкм/с в температурном интервале $T = (1,65 \dots 4,2) \pm 10^{-2}$ К.

Состояние электронной системы сплава (нормальное или сверхпроводящее) изменяли при помощи магнитного поля с индукцией в зависимости от концентрации сплава в диапазоне $B \geq B_{с2} = 0,1 \dots 0,65$ Тл.

Регистрацию сигнала во времени производили электронным самопишущим потенциометром КСП-4 (временное разрешение 1 с) и цифровым мультиметром Sanwa PC 520 M (временное разрешение 0,3 с).

Относительное удлинение образца определяли по соотношению $\varepsilon = v_{шт} \cdot t / l_0$, где l_0 – начальная длина рабочей части образца с погрешностью $\pm 0,1$ %.

Деформирующее напряжение рассчитывали по соотношению $\sigma = P \cdot (1 + \varepsilon) / S$ (S – начальное сечение образца) с погрешностью $\pm 0,5 \cdot 10^4$ Па.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Неустойчивость пластической деформации в виде аperiодических скачков деформирующей нагрузки малой амплитуды может быть рассмотрена на примере сплава Pb-27 ат.% In, для которого отрезки кривой нагружения в координатах сила P – время t показаны на рис. 1, а и б.

Пластическое течение этого сплава при $T = 3,3$ К в нормальном состоянии ($B \geq 0,5$ Тл) происходит плавно и равномерно, а его переход в сверхпроводящее состояние ($B = 0$) приводит, во-первых, к снижению уровня деформирующего усилия на величину $\delta P_{нс}$ за счет уменьшения силы электронного торможения дислокаций [5, 6] и, во-вторых, к следующим друг за другом сбросам нагрузки с амплитудой $\delta P_{ск}$, которым соответствует удлинение образца на $\delta l_{ск}$.

При понижении температуры испытания до $T = 1,97$ К малоамплитудная скачкообразная деформация в сверхпроводящем состоянии подавляется и возникает в нормальном состоянии ($B \geq 0,55$ Тл).

В дальнейшем скачками малой или большой амплитуды будем называть соответственно сбросы деформирующего напряжения $\delta \sigma_{ск} \sim (10^{-2} \dots 10^{-1})$ МПа ($\delta \sigma_{ск} / \delta \sigma_{нс} \leq 0,1 \dots 0,2$) и $\delta \sigma_{ск} \sim (1 \dots 10)$ МПа.

Необходимо отметить, что скачки малой амплитуды в сверхпроводящем или в нормальном состоянии возникают соответственно в интервалах $\sim (2 \dots 4,2)$ и $\sim (1,65 \dots 2)$ К, а скачки большой амплитуды – только в нормальном состоянии при температурах $\sim (1,65 \dots 2)$ К.

Для получения количественных параметров, характеризующих неустойчивость течения сплавов, весь диапазон пластической деформации разбивали на участки $\Delta \varepsilon = 0,5 \dots 0,7$ %. В качестве локальных характеристик использовали: средние величины скачка $\delta \sigma_{ск}$ и удлинения при сбросе нагрузки $\delta l_{ск}$, а также количество скачков $n_{ск}$ на 1 % относительного удлинения на интервале $\Delta \varepsilon$.

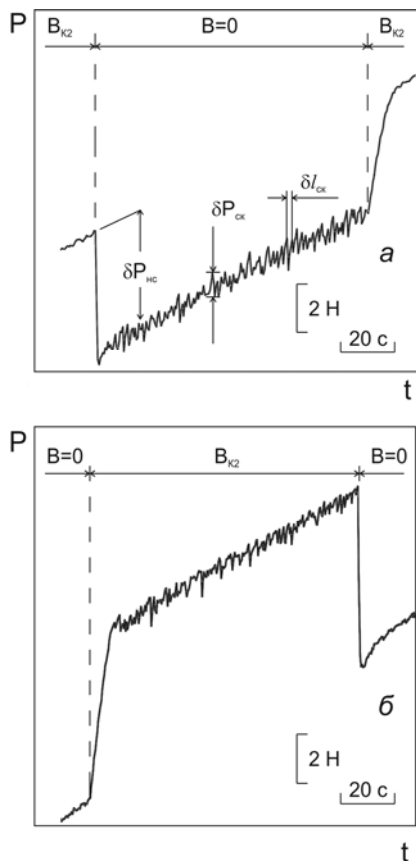


Рис. 1. Участки кривых $P(t)$ сплава Pb-27 ат.% In для $T = 3,3$ K (а) и $T = 1,97$ K (б) со сменой нормального (B_{K2}) и сверхпроводящего ($B=0$) состояний

Кроме того, рассчитывали средние значения $\langle \delta \sigma_{ск} \rangle$ и $\langle \delta n_{ск} \rangle$ для всего интервала деформаций, в котором наблюдали сбросы нагрузки. Общее количество скачков $N_{ск}$ на всем интервале деформаций зависело от концентрации сплава Pb-In, температуры испытания и находилось в пределах 500...3000.

В качестве переменной величины, определяющей степень искажения кристаллической решетки в процессе низкотемпературной деформации, использовали величину относительного удлинения образца ϵ .

В сверхпроводящем состоянии сплава для $\epsilon \leq 10\%$ величина $\delta \sigma_{ск}$ практически не изменяется с увеличением степени относительного удлинения и составляет $\sim 10^{-2}$ МПа (рис. 2,а). В интервале $\epsilon = 15...20\%$ амплитуда $\delta \sigma_{ск}$ плавно нарастает до $1,5 \cdot 10^{-1}$ МПа.

Скачки большой амплитуды при $T = 3,5$ K не наблюдаются во всем интервале пластической деформации, кроме области образования сужения («шейки») на рабочей части образца.

Зависимость $n_{ск}(\epsilon)$ имеет колоколообразную форму со значением $n_{ск} \sim 250$ в максимуме (см. рис. 2,б).

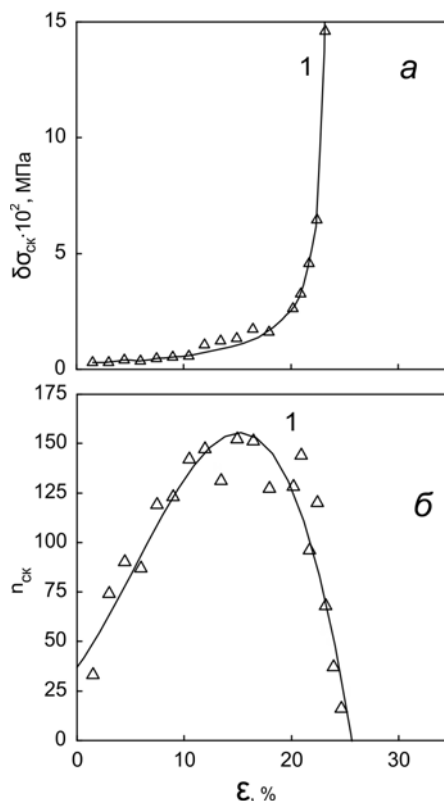


Рис. 2. Амплитуда $\delta \sigma_{ск}$ (а) и концентрация скачков $n_{ск}$ (б) как функция ϵ для сплава Pb-20 ат.% In в сверхпроводящем состоянии ($T = 3,5$ K)

Изменение амплитуды малых (1) и больших (2) скачков деформирующего напряжения от ϵ для сплава Pb-27 ат.% In в нормальном состоянии ($T = 1,65$ K) показано на рис. 3,а. В отличие от сверхпроводящего состояния (см. рис. 2,а), при деформации в нормальном состоянии амплитуда малых скачков $\delta \sigma_{ск}$ не зависит от ϵ и по абсолютной величине составляет $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ МПа.

Скачки большой амплитуды наблюдаются при $\epsilon \geq 10\%$, и их амплитуда монотонно увеличивается от 0,15 до 1 МПа (см. рис. 3,а).

Зависимости $n_{ск}(\epsilon)$ (см. рис. 3,б) для скачков малой и большой амплитуд имеют примерно одинаковую колоколообразную форму, однако максимальные концентрации скачков отличаются примерно в 5 раз.

Поскольку параметры скачкообразной деформации в ряде случаев изменяются с увеличением степени деформации (см. рис. 2 и 3), то для сопоставления сплавов разного состава целесообразно использовать такие усредненные характеристики, как $\langle \delta \sigma_{ск} \rangle$ и $\langle \delta n_{ск} \rangle$.

Концентрационные зависимости усредненной амплитуды и концентрации скачков при разных состояниях электронной системы сплавов системы Pb-In (сверхпроводящее состояние при $T = 3,5$ K и нормальное состояние при $T = 1,65$ K) показаны на рис. 4 и 5.

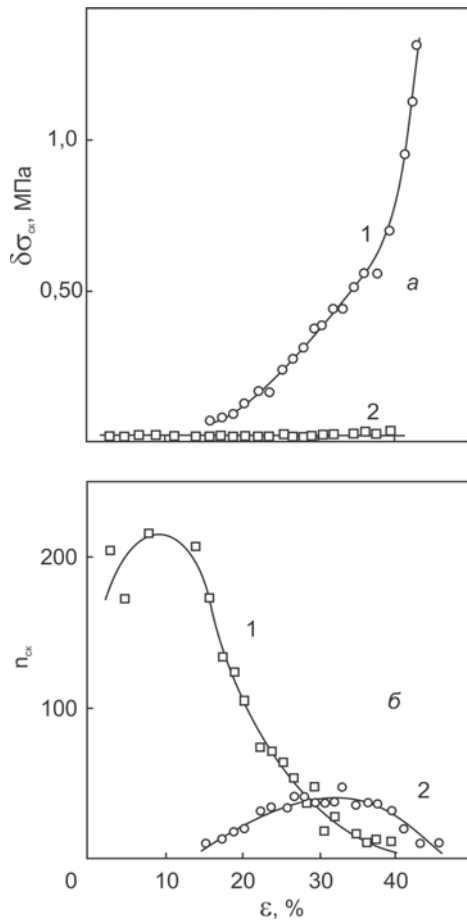


Рис. 3. Амплитуда $\delta\sigma_{cr}$ (а) и концентрация скачков n_{cr} (б) как функция ϵ для сплава Pb-27at.%In в нормальном состоянии ($T=1,65$ K) для скачков малой (1) и большой (2) амплитуд

Рассмотрим зависимости $\langle\delta\sigma_{cr}\rangle(\epsilon)$ и $\langle\delta n_{cr}\rangle(\epsilon)$ для случая малоамплитудной скачкообразной деформации в различных состояниях электронной системы сплавов.

Как следует из рис. 4,а и 5,а, максимальная амплитуда скачка примерно одинакова для разных состояний электронной системы металла. Однако $\langle\delta\sigma_{cr}\rangle$ в нормальном состоянии нарастает, а в сверхпроводящем снижается с увеличением концентрации второго компонента (In) в сплаве.

Концентрационная зависимость $\langle\delta n_{cr}\rangle(C)$ для сверхпроводящего и нормального состояний имеет колоколообразную форму с различием концентрации скачков в максимуме ($C \sim 30$ ат. % In) примерно в два раза (см. рис. 4,б и 5,а).

Еще одной из характеристик локальной неустойчивости пластического течения является величина удлинения образца δl_{cr} , возникающая при каждом скачке деформирующего напряжения $\delta\sigma_{cr}$ (см. рис. 1,а).

Измерения δl_{cr} показали, что зависимость $\delta l_{cr}(\delta\sigma_{cr})$ является единой для сверхпроводящего и

нормального состояний сплава Pb-27 ат.% In и линейной для диапазона малых и средних амплитуд скачков $(1 \dots 1,4) \cdot 10^2$ Па (рис. 6,а,б).

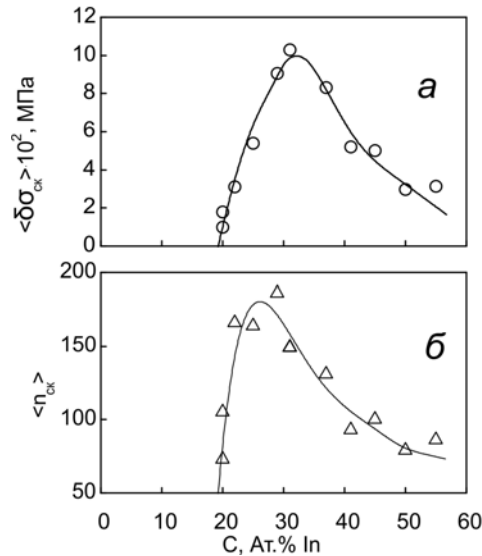


Рис. 4. Изменение $\delta\sigma_{cr}$ (а) и n_{cr} (б) от концентрации индия. Сверхпроводящее состояние сплавов ($B=0$; $T=3,5$ K)

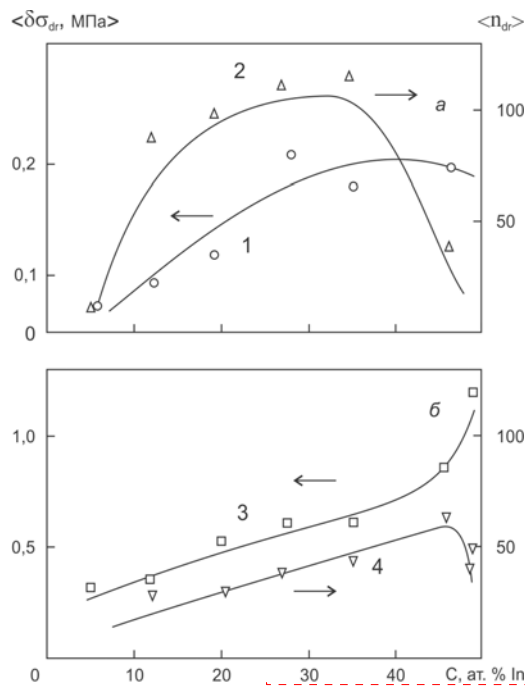


Рис. 5. Изменение $\delta\sigma_{cr}$ (а) и n_{cr} (б) от концентрации индия. Нормальное состояние сплавов ($B \geq 0,55$ Tл; $T=1,65$ K): скачки малой (1, 2) (а) и большой (3, 4) (б) амплитуд

Примечание [С1]: Рисунок 4 был изменен на другой, в силу того что в старом были неточности

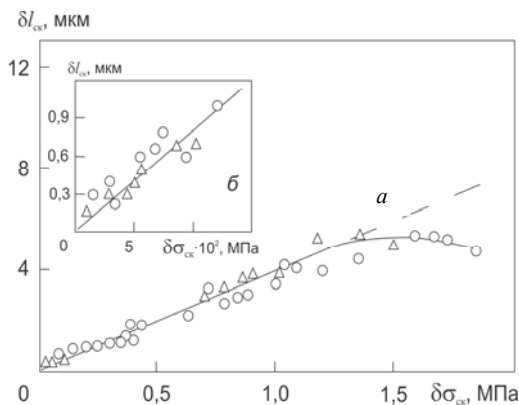


Рис. 6. Зависимость удлинения образца $\delta l_{\text{ск}}$ от $\delta\sigma_{\text{ск}}$ при деформировании сплава Pb-27ат.%In в нормальном (○) и сверхпроводящем (△) состояниях

Для $\delta\sigma_{\text{ск}} \geq 1,5$ МПа наблюдается отклонение от линейности в сторону меньших значений $\delta l_{\text{ск}}$ возможно из-за неполной релаксации образца после сброса нагрузки большой амплитуды или же в результате исчерпания ресурса подвижных групп дислокаций.

По величине $\delta l_{\text{ск}}$ можно оценить количество дислокаций $\Lambda = \delta l_{\text{ск}}/b$ ($b \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м – вектор Бюргерса), определяющих вклад в абсолютное удлинение образца при каждом скачке нагрузки.

Для диапазона $\delta\sigma_{\text{ск}} = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ МПа величина удлинения составляет $\delta l_{\text{ск}} = 0,1 \dots 1$ мкм (см. рис. 6,б), что соответствует группе $\Lambda \sim 10^2 \dots 10^3$ дислокаций, а для $\delta\sigma_{\text{ск}} = 0,1 \dots 1,5$ МПа соответственно – группе $\Lambda \sim 10^3 \dots 10^4$ дислокаций.

При общей плотности $N_{\text{д}} \sim 10^{13} \dots 10^{14}$ м⁻² изменения абсолютной ($\Delta N_{\text{ск}} \approx \Lambda/l_s^2$) и относительной плотности дислокаций составят $\Delta N_{\text{ск}} \approx 10^9 \dots 10^{11}$ м⁻² и $\Delta N_{\text{ск}}/N_{\text{д}} \sim 10^{-5} \dots 10^{-3}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о протекании скачкообразной деформации как в нормальном, так и в сверхпроводящем состояниях на фоне общего деформационного упрочнения сплава (см. рис. 1). Это указывает на одновременное протекание в дислокационной системе следующих процессов: взаимодействие и динамика собственных и примесных дефектов, а также частичное (локальное) скачкообразное разупрочнение кристаллической решетки в результате специфического поведения различных по мощности дислокационных групп.

В ГЦК-кристаллах в процессе пластической деформации формируется характерное неоднородное объемное распределение линейных дефектов (ячеистая структура). Для такой ячеистой структуры характерна градиация скопления дефектов по их плотности (отдельные дислокации, дислокационные группы различной мощности) [7].

Такие отличающиеся по мощности скопления дислокаций являются ответственными за

возникновение скачков с малой и большой амплитудой. В пользу такого предположения свидетельствуют оценки количества дислокаций Λ , формирующих скачки различных амплитуд. Неоднородное распределение дислокаций способствует созданию различного уровня внутренних дальнедействующих напряжений ($\sigma_{\text{д}}$) в объеме кристаллической решетки. Наиболее высокий уровень $\sigma_{\text{д}}$ наблюдается в стенках ячеек, далее следуют небольшие скопления дислокаций внутри ячеек, одиночные дислокации перемещаются в усредненном поле внутренних напряжений.

При флуктуациях внешнего напряжения σ уровень эффективного напряжения $\sigma^* \rightarrow 0$ ($\sigma^* = \sigma - \sigma_{\text{д}}$), что создает неустойчивость различных по мощности групп дислокаций и увеличивает вероятность преодоления потенциальных барьеров (без участия термической активации) сначала внутри ячеек, а затем в стенках ячеек.

Подавление скачкообразной деформации в сверхпроводящем и ее возникновение в нормальном состояниях у сплавов системы Pb-In в результате снижения температуры деформирования может определяться сменой механизма преодоления потенциального барьера движущимися дислокациями.

При преобладающем термоактивируемом механизме, контролирующем движение дислокаций, при $T \leq 4,2$ К у сплавов Pb-(4...49) ат.% In ($T_{\text{к}} \sim 7$ К) уменьшается коэффициент электронного торможения [5], что увеличивает вероятность открепления дислокаций от препятствия. Для более низких температур ($T < 2$ К) наблюдается снижение чувствительности динамики дислокаций к сверхпроводящему переходу, что указывает на возможное проявление атермических механизмов движения дислокаций [5, 6].

Квантовое туннелирование дислокаций, различного рода инерционные способы преодоления потенциального барьера и др. [5, 6] оказывают более эффективное воздействие на динамику и на открепление от стопоров различных по мощности дислокационных групп в нормальном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Пустовалов // *ФНТ*. 2008, т.34, с. 871.
2. В.С. Бобров, И.В. Виденский. *Материалы XX Всесоюзного совещания по физике низких температур*. Черногоровка, 1979, ч.3, с.79.
3. В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, С.В. Савич // *ФНТ*. 2008, т. 34, с. 300.
4. В.С. Крыловский, С.В. Лебедев // *Вісник ХНУ. Серія «Фізика»*. 2010, № 914, с. 102.
5. В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. *Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах*. М.: «Металлургия», 1975.
6. О.В. Клявин. *Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах*. М.: «Наука», 1987.
7. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. *Механические свойства металлов*. М.: «Металлургия», 1979.

Статья поступила в редакцию 25.05.2011 г.

**СТРИБКОПОДІБНА ДЕФОРМАЦІЯ СПЛАВІВ Pb-(4...49) ат.% In
У НОРМАЛЬНОМУ І НАДПРОВІДНОМУ СТАНАХ
У ТЕМПЕРАТУРНОМУ ІНТЕРВАЛІ 1,65...4,2 К**

В.П. Лебедев, В.С. Крыловський, С.В. Лебедев

Наведено результати вимірювання параметрів низькотемпературної стрибкоподібної деформації різного масштабу сплавів Pb-(4...49) ат.% In. Стрибки деформуючої напруги малої амплітуди $\sim 0,1$ МПа з концентрацією до ~ 200 спостерігаються у всьому діапазоні пластичної течії як у нормальному (1,65...2 К), так і в надпровідному (2...4,2 К) станах сплавів. При деформуванні сплавів у нормальному стані спостерігаються також стрібки з амплітудою ~ 1 МПа і концентрацією до ~ 50 . Обговорюються можливі механізми явища.

**DISCONTINUOUS STRAIN ALLOYS Pb-(4...49) at.% In
IN NORMAL AND SUPERCONDUCTIVITY STATE
IN THE TEMPERATURE RANGE 1,65...4,2 K**

V.P. Lebedev, V.S. Krylovskiy, S.V. Lebedev

The results of measurements of low-temperature jump-like deformation of different amplitude Pb-(4...49) at.% In alloys are presented. Jumps in the deforming stress of small amplitude ~ 0.1 MPa and concentrations up to ~ 200 observed in the whole range of plastic flow in the normal (1,65...2 K) and superconducting (2...4,2 K) states of alloys. During deformation of alloys in the normal state, there are also jumps with amplitude of ~ 1 MPa and the concentration up to ~ 50 . Possible mechanisms of the phenomenon are discussed.