

УДК 538.945:539.214

PACS: 83.50.-v Деформация и течение материалов

83.60.Wc Нестабильность течения

Скачкообразная деформация сплава Pb- 27 ат.% In в нормальном состоянии

В.С. Крыловский, С.В. Лебедев

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

sergey.v.lebedev@mail.ru

При деформации в нормальном состоянии поликристаллического сплава Pb - 27 ат.% In и температуре $T=1,9$ К обнаружена малоамплитудная неустойчивость пластического течения. Амплитуда скачков ~ 5 Па не зависит, а их концентрация убывает с увеличением степени относительного удлинения. С развитием деформации на фоне скачков малой амплитуды возникают скачки с амплитудой $\sim (0,5-2)$ МПа. Обсуждается возможность сосуществования скачков малой и большой амплитуд.

Ключевые слова: скачок деформирующего напряжения, концентрация скачков, нормальное состояние, степень деформации.

При деформації у нормальному стані полікристалічного сплаву Pb - 27 ат.% In при температурі $T=1,9$ К виявлено малоамплітудну нестійкість пластичної течії. Амплітуда скидів ~ 5 Па не залежить а їх концентрація зменшується із збільшенням ступеня відносного подовження. З розвитком деформації на фоні скидів малої амплітуди з'являються скиди за амплітудою $\sim (0,5-2)$ МПа. Можливість співіснування скидів малою та великої амплітуди обговорюється.

Ключові слова: скид деформуючого напруження, концентрація скидів, нормальний стан, ступінь деформації.

During deformation in normal state polycrystals of Pb - 27 ат.% In alloy at temperature $T=1,9$ K the small amplitude instability of plastic flow has been appeared. The drops amplitude ~ 5 Pa don't dependent and their concentration decrease at increasing of elongation degree. At increasing of deformation on background of small amplitude drops appear the drops of $\sim (0,5-2)$ MPa amplitude. The possibility of coexistence of small and large amplitude drops is discussed.

Keywords: deformation stress drops, drop concentration, normal state, deformation degree.

Введение

В ряде металлов и сплавов при нагружении с постоянной скоростью при $T < (20 - 30)$ К наблюдается неустойчивость пластического течения в виде апериодических скачков (сбросов) деформирующего напряжения на кривой упрочнения [1]. Характерная амплитуда скачков находится в пределах $\sim (1-10)$ МПа при деформации металла как в нормальном, так и в сверхпроводящем состояниях.

Однако, в работах [2 - 4] наблюдали также скачки малой амплитуды ($10^{-2}-10^{-1}$) МПа при деформации чистого свинца только в сверхпроводящем состоянии.

В дальнейшем, малоамплитудная неустойчивость пластического течения в сверхпроводящем состоянии была обнаружена и изучена на сплавах системы Pb - In [5,6]. Характерной особенностью скачков малой амплитуды для сплавов системы Pb - In является проявление их в очень узком температурном интервале $\Delta T \approx (2-4,2)$ К, наличие высокой чувствительности их величины к концентрации дефектов структурного и примесного типа, напряженности внешнего магнитного поля.

В связи с тем, что скачкообразная деформация

с большой амплитудой проявляется в различных состояниях электронной системы [1], следовало предположить о возможности проявления скачков малой амплитуды не только в сверхпроводящем, но и в нормальном состояниях металла.

Поэтому в данной работе была предпринята попытка определения условий возникновения малоамплитудной неустойчивости пластического течения в нормальном состоянии сплава системы Pb - In с концентрацией второго компонента, соответствующей максимальному проявлению скачков малой амплитуды в сверхпроводящем состоянии [5,6].

Методика эксперимента

Объектом исследований являлся поликристаллический сплав Pb-27 ат.% In, для приготовления которого использовали исходные компоненты Pb (99,9996%) и In (99,99%). Образцы имели форму плоскопараллельных пластин с размерами рабочей части $(2 \times 4 \times 15)$ мм³ с уширениями под захваты разрывной машины.

Нагрузку на образце в процессе растяжения с постоянной скоростью удлинения фиксировали

по величине разбаланса тензометрического моста сопротивления, связанного с динамометром. Величина разбаланса, пропорциональная величине действующей нагрузки P , после усиления фотоэлектрическим усилителем Ф - 116/1 регистрировалась в координатах $P - t$ (время) электронным самопишущим потенциометром КСП-4 (разрешение во времени 1с) и цифровым мультиметром Sanwa PC-520M (временное разрешение 0,3с).

Относительное удлинение определяли из соотношения $\epsilon = v_{шт}/l_0$ ($v_{шт} = 0,5 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$ - скорость перемещения штока нагружающего устройства, l_0 - начальная длина рабочей части образца) с погрешностью $\pm 0,1\%$, а деформирующее напряжение рассчитывали как $\sigma = P(1 + \epsilon)/S_0$ (S_0 - начальное сечение образца) с погрешностью $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$.

Испытания проводили в среде жидкого гелия при с точностью поддержания температуры $\pm 10^{-2} \text{ К}$.

Состояние электронной подсистемы сплава (сверхпроводящее, нормальное) изменяли магнитным полем сверхпроводящего соленоида продольной ориентации относительно оси растяжения образца.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для обнаружения скачкообразной деформации сплава $\text{Pb} - 27 \text{ ат.}\% \text{ In}$ в нормальном состоянии использовали методику ступенчатого ($\Delta T \approx 1-0,15 \text{ К}$) снижения температуры в интервале (3,3-1,91) К с непрерывной регистрацией кривой нагружения в координатах нагрузка P - время t . После установления $T = \text{const}$ в процессе непрерывного растяжения с постоянной скоростью одного и того же образца производили циклическое изменение нормального и сверхпроводящего состояний, что сопровождалось изменением уровня действующей нагрузки на $\delta P_{нс}$ за счет перестройки электронной системы сплава [1].

В результате было установлено, что при $T = 3,3 \text{ К}$ переход сплава в нормальное состояние полностью подавляет неустойчивость течения в сверхпроводящем состоянии (рис.1, участок $P(t) - 1$). Понижение температуры до $T = 2,3 \text{ К}$ приводит к тому, что скачкообразная деформация сплава возникает в нормальном и в значительной мере подавляется в сверхпроводящем состояниях (рис.1, участок $P(t) - 2$). При более низких температурах скачки малой амплитуды наблюдаются практически только в нормальном состоянии сплава (рис.1, участок $P(t) - 3$).

Скачки нагрузки величиной $\sim 1 \text{ Н}$ (рис.1) отражают физические процессы, протекающие в сплавах системы $\text{Pb} - \text{In}$ при заданных параметрах механических испытаний и не являются помехами в системе регистрации нагрузки деформирующего устройства. Малоамплитудная скачкообразная деформация не исчезает при кратковременном

($\sim 30 \text{ с}$) выключении системы откачки паров над жидким гелием для $T \leq 4,2 \text{ К}$ (исключение вибрации разрывной машины и системы регистрации нагрузки в результате работы форвакуумного насоса). Изменение состояния электронной системы внешним магнитным полем позволяет наблюдать при определенных температурах скачки нагрузки небольшой амплитуды только в сверхпроводящем [5,6] или же только в нормальных состояниях металла (рис.1). Кроме того, малоамплитудная неустойчивость пластического течения сплавов системы $\text{Pb} - \text{In}$ является функцией температуры испытания, состояния электронной системы, концентрации индия в сплаве и степени деформации образца [5,6].

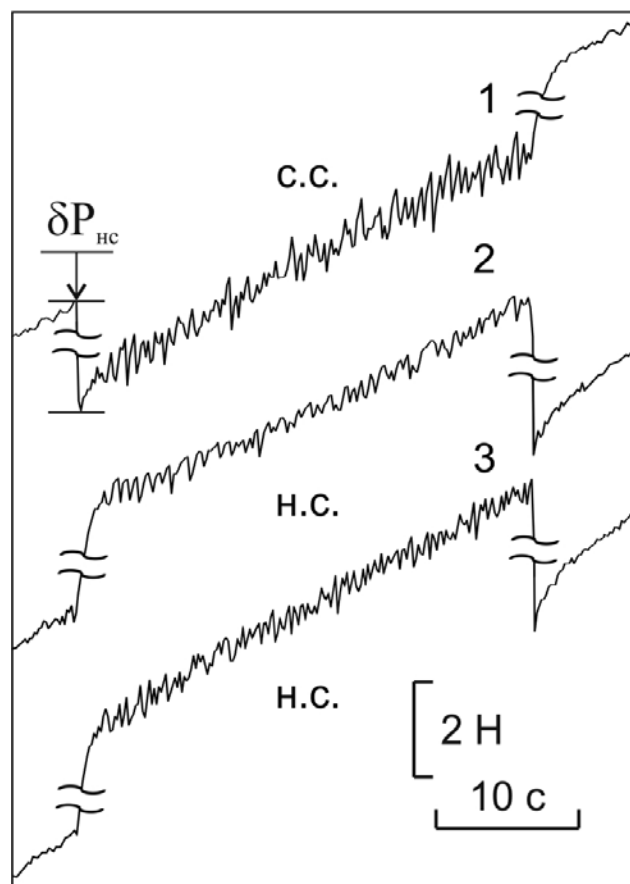


Рис.1 Проявление скачкообразной деформации при различных состояниях электронной системы $\text{Pb} - 27 \text{ ат.}\% \text{ In}$ и температурах испытания T , К: 1- 3,3; 2- 2,3; 3- 2,06.

В дальнейшем для изучения параметров неустойчивости пластического течения на разных этапах деформирования сплава $\text{Pb} - 27 \text{ ат.}\% \text{ In}$ в нормальном состоянии использовали постоянную температуру испытания $T = 1,91 \text{ К}$.

На рис.2 показаны участки кривой нагружения $P(t)$ для нормального состояния сплава $\text{Pb} - 27 \text{ ат.}\% \text{ In}$ на различных этапах его пластического течения. Как видно, в сверхпроводящем состоянии неустойчивость пластического течения не проявляется (рис.1); при $T = 1,91 \text{ К}$ по достижении предела текучести

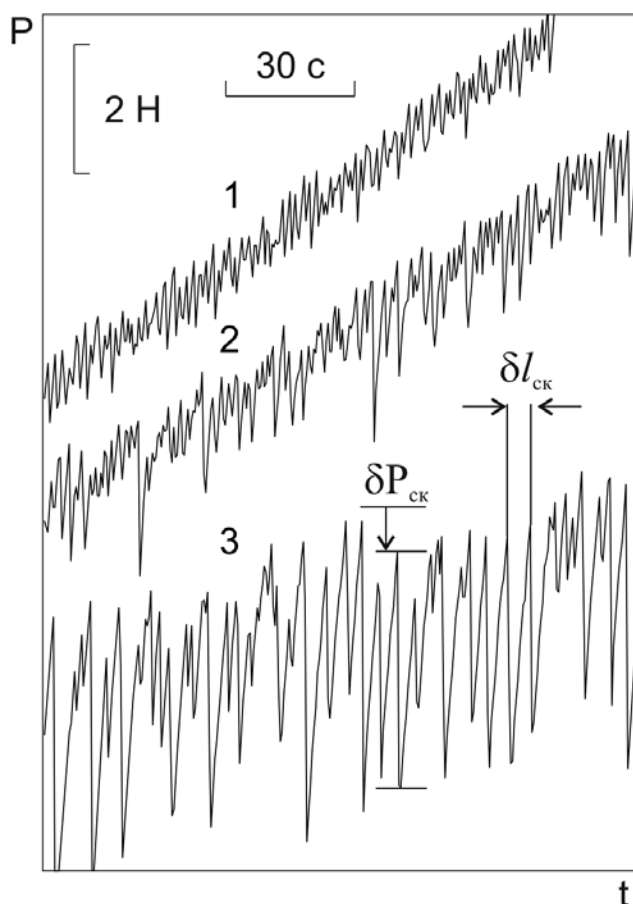


Рис.2 Участки кривых нагружения $P(t)$ поликристаллического сплава Pb - 27 ат.% In в нормальном состоянии ($T=1,91$ K; $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) для разных степеней относительного удлинения ($\epsilon \sim t$), %: 1- 8,4; 2- 14,7; 3- 31,4.

возникают скачки нагрузки амплитудой ~ 1 Н (1) в нормальном состоянии (рис.2, участок $P(t) - 1$); при средних и больших степенях относительного удлинения ϵ ($\epsilon \sim t$) на фоне малоамплитудной неустойчивости течения возникают скачки нагрузки с амплитудой $\sim (2 - 4)$ Н (рис.2; участки $P(t) - 2, 3$). При деформациях вблизи предела прочности материала скачки макромасштаба фактически полностью подавляют проявление скачков малой амплитуды. Общее количество сбросов нагрузки разного масштаба на кривой деформационного упрочнения составляло соответственно $2 \cdot 10^3$ и $1,5 \cdot 10^3$.

В качестве характеристик скачкообразной деформации были выбраны: средняя величина скачка $\delta\sigma_{\text{ск}}$ и количество скачков $n_{\text{ск}}$ на 1 % относительного удлинения. Усреднение производилось по массиву $\sim (50 - 100)$ сбросов нагрузки на интервале $\Delta\epsilon \approx (0,5 - 0,75)\%$. Амплитуду и концентрацию скачков определяли отдельно для малых и больших сбросов нагрузки (различие в $\Delta P_{\text{ск}}$ составляло $\sim 2-10$ раз).

Результаты пересчета амплитуды сбросов нагрузки $\Delta P_{\text{ск}}$ в усредненную величину сброса деформирующего напряжения $\delta\sigma_{\text{ск}}$ и определения концентрации скачков $n_{\text{ск}}$ для нормального состояния сплава Pb - 27 ат.% In

показаны на рис.3.

Скачки деформирующего напряжения малой амплитуды возникают после достижения предела текучести, а их величина $\delta\sigma_{\text{ск}} \approx 10^5 \text{ Па}$ остается неизменной во всем интервале деформаций (рис.3, а - 1). С развитием деформации, начиная с $\epsilon_{\text{кр}} > 8\%$ до $\sim 40\%$, на фоне малоамплитудной неустойчивости наблюдаются скачки, амплитуда $\delta\sigma_{\text{ск}} \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$

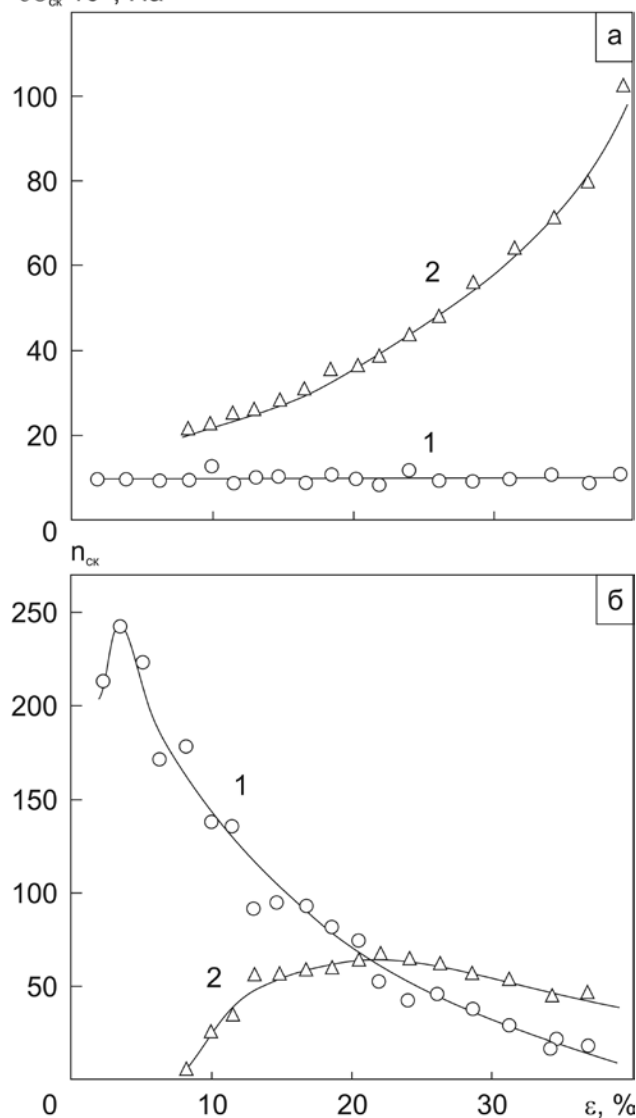


Рис.3 Изменение величины $\delta\sigma_{\text{ск}}$ (а) и концентрации $n_{\text{ск}}$ (б) скачков от степени относительного удлинения сплава Pb - 27 ат. % In (нормальное состояние; $T = 1,91$ K). Скачки малой (1) и большой (2) амплитуд.

которых нарастает от 0,2 до 1 МПа (рис.3, а - 2).

Зависимости $n_{\text{ск}}(\epsilon)$ (рис.3,б) для скачков малой (1) и большой (2) амплитуд имеют, примерно, одинаковую колоколообразную форму с отличием в концентрации скачков в максимуме ~ 4 раза. Если малоамплитудная деформация проявляется во всем интервале деформаций, то скачки напряжения большой амплитуды наблюдаются, начиная с некоторого $\epsilon_{\text{кр}}$.

Еще одной характеристикой неустойчивости пластического течения является величина удлинения

образца $\delta l_{\text{ск}}$, которая возникает в процессе сброса деформирующего напряжения на $\delta\sigma_{\text{ск}}$. Из результатов измерения этого удлинения следует: зависимость $\delta l_{\text{ск}}(\delta\sigma_{\text{ск}})$ является единой для скачков малой и большой амплитуд (рис.4); в диапазоне $\delta\sigma_{\text{ск}} = (0,5 - 3,5)$ МПа $\delta l_{\text{ск}}$ находится в пределах $\sim (1 - 3,5)$ мкм (рис.4,а) и при $\delta\sigma_{\text{ск}} < 10^3$ Па $\delta l_{\text{ск}} = (0,1 - 0,5)$ мкм (рис.4,б); для $\delta\sigma_{\text{ск}} > 2$ МПа наблюдается отклонение от линейности в сторону меньших значений $\delta l_{\text{ск}}$ (при высокой частоте повторения и большой амплитуде скачков их начальная и конечная фазы могут частично перекрываться).

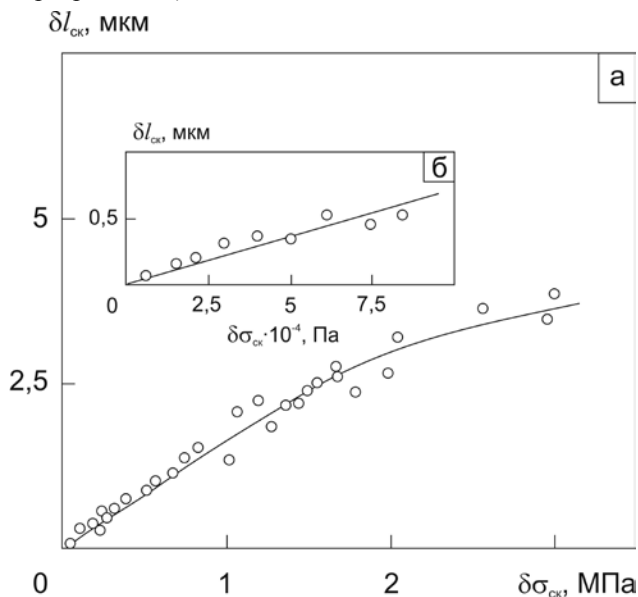


Рис.4 Величина удлинения образца $\delta l_{\text{ск}}$ при различных амплитудах скачков $\delta\sigma_{\text{ск}}$. Общий вид (а) и начальный участок (б) зависимости $\delta l_{\text{ск}}(\delta\sigma_{\text{ск}})$.

По величине $\delta l_{\text{ск}}$ можно оценить количество дислокаций $\Lambda = \delta l_{\text{ск}}/b$ (b - вектор Бюргерса $\sim 3 \cdot 10^{-10}$ м), дающих вклад в удлинение образца при сбросе нагрузки. Для скачков с амплитудой $\delta\sigma_{\text{ск}} = (1 - 10) \cdot 10^4$ Па величина удлинения образца составляет $(0,1 - 0,5)$ мкм (рис.4,б), что соответствует активации группы дислокаций $\Lambda \approx (10^2 - 10^3)$ шт. Для скачков с амплитудой $\delta\sigma_{\text{ск}} = (0,5 - 3,5)$ МПа величина $\delta l_{\text{ск}} = (0,5 - 3,5)$ мкм (рис.4,а), а $\Lambda \approx (10^3 - 10^4)$ шт. Эти оценки показывают, что при сбросах $\delta\sigma_{\text{ск}}$ разного масштаба задействованы группы дислокаций, мощность которых может отличаться $\sim (10 - 10^2)$ раз.

Ход участков кривых нагружения $P(t)$ (рис.1, 2) свидетельствует о том, что скачкообразная деформация сплава происходит на фоне общего деформационного упрочнения сплава. Поэтому можно рассматривать одновременность протекающих в дислокационной системе таких независимых процессов: взаимодействие и динамика собственных и примесного типа дефектов (общее деформационное упрочнение), а также частичное (локальное) скачкообразное разупрочнение кристаллической решетки в результате специфического поведения отдельных дислокационных групп.

В ГЦК кристаллах с низким значением энергии дефекта упаковки в процессе пластической деформации формируется характерное неоднородное объемное распределение линейных дефектов (ячеистая структура). Для такой ячеистой структуры характерна градиация скоплений 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 (рис.4).

Неоднородное распределение дислокаций способствует созданию различного уровня внутренних дальнедействующих напряжений (σ_d) в объеме кристаллической решетки. Наиболее высокий уровень σ_d имеет место 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 $\sigma^* \rightarrow 0$ ($\sigma^* = \sigma - \sigma_d$), 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 состоянии [44%] и ее возникновение в нормальном состоянии у сплавов системы Pb - In в результате снижения температуры деформирования может определяться сменой механизма преодоления потенциального барьера движущимися дислокациями. Более детальный анализ способа преодоления потенциального барьера может быть выполнен в дальнейшем при наличии дополнительных экспериментальных данных.

1. В.В.Пустовалов. ФНТ **34**, 9, 871 (2008).
2. В.С. Бобров, И.В. Виденский, *Материалы XX Всесоюзное совещание по физике низких температур, Черногловка* (1979), часть 3, с. 79-81.
3. E.Y. Gutmanas, Y. Estrin, *Phys. Status Solid (a)* **92**, 137 (1985).
4. И.Н. Кузьменко, В.В. Пустовалов, *Докл. АН УССР* **282**, 599 (1985).
5. В.П.Лебедев, В.С.Крыловский, С.В.Лебедев, С.В.Савич. ФНТ **34**, 3, 300 (2008).
6. С.В. Лебедев. Вестник ХНУ, серия «Физика», №865, 68 (2009).
7. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, *Механические свойства металлов*, Металлургия, М. (1979).