

УДК 538.945:539.214

PACS: 83.50.-v Deformation and flow

83.60.Wc Flow instabilities

Малоамплитудная деформация сплава Pb-44 ат.% In в интервале температур (1,65 - 4,2) К

С.В. Лебедев

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

На поликристаллическом сплаве Pb-44 ат.% In изучена нестабильность пластического течения в интервале (1,65-4,2) К. При $T > 3,5$ К наблюдаются только скачки амплитудой (0,02-0,1) МПа, а при более низких температурах на фоне малоамплитудной неустойчивости возникают скачки (0,2-2) МПа. Обсуждаются механизмы проявления малоамплитудной скачкообразной деформации в узком температурном интервале.

Ключевые слова: низкая температура, нестабильность пластического течения, сброс напряжения, сплав, дефект деформационного и примесного типа.

На полікристалічному сплаві Pb-44 ат.% In вивчена нестабільність пластичного течії в інтервалі (1,65-4,2) К. При $T > 3,5$ спостерігаються тільки стрибки амплітудою (0,02-0,1) МПа, а при більш низьких температурах на тлі малоамплітудної нестійкості виникають стрибки (0,2-2) МПа. Обговорюються механізми прояву малоамплітудної стрибкоподібно деформації у вузькому температурному інтервалі.

Ключові слова: низька температура, сплав, нестабільність пластичної течії, скидання напруги, дефект деформаційного і домішкових типу.

On the polycrystalline alloy Pb-44 at.% In the instability of plastic flow in the interval (1,65-4,2) K have been studied. At $T > 3.5$ K are observed only jumps amplitude (0,02-0,1) MPa, and at lower temperatures on the background of small-amplitude instability arise racing (0,2-2) MPa. The mechanisms of the manifestation of small-amplitude jump deformation in a narrow temperature range is discussed.

Key words: instability of plastic flow, deformation drop, alloy, impurity defect.

Введение

У ряда металлов и сплавов при низких температурах наряду с однородной деформацией с постоянной скоростью наблюдается неустойчивость пластического течения в виде аperiodических сбросов нагрузки, которые можно классифицировать по величине амплитуды (крупные (1-10) МПа и мелкие (10^{-1} - 10^{-2}) МПа) [1].

Ранее было показано [2], что в сверхпроводящем состоянии при температуре испытания $T=3,5$ К в широком интервале деформаций сплавов системы Pb - (0,1-55) ат. % In наблюдается неустойчивое пластическое течение с различной величиной амплитудой скачка $\sim (10^{-2}$ - 10^{-1} МПа). Если амплитуда крупномасштабных скачков нарастает с понижением температуры, то температурная зависимость малоамплитудной неустойчивости пластического течения остается невыясненной, хотя в работе [3] приведены разрозненные данные для чистого свинца в интервале (1,9-4,2)К.

В связи с этим необходимо определение температурного интервала проявления

малоамплитудной скачкообразной деформации в сверхпроводящем состоянии при фиксированной концентрации сплава.

Объект исследования и методика измерений

Объектом исследования являлся поликристаллический сплав Pb-44 ат.% In, для приготовления которого использовали Pb (99,996%) и In (99,99%).

После вакуумной плавки слиток прокатывали при комнатной температуре со степенью обжатия 0,8-0,9. Вырезанные из листа образцы имели вид плоскопараллельных пластин (2x4x15) мм³ с уширениями под захваты разрывной машины. После отжига при комнатной температуре образцы сохраняли при 250 К.

Одноосное растяжение с постоянной скоростью проводили в среде жидкого гелия при (1,65-4,2) К с точностью фиксации температурного режима $\pm 10^{-2}$ К.

Диаграмму деформирования со скоростью $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ в координатах нагрузка Р - время t регистрировали электронным самопишущим потенциометром КСП-4

(временное разрешение 1с) и цифровым мультиметром Sanwa PC 520 M (временное разрешение 0,3с).

Относительное удлинение образца определяли из соотношения $\varepsilon = v_{\text{шт}} \cdot t / l_0$ (скорость перемещения штока нагружающего устройства составляла $v_{\text{шт}} = 0,5$ мкм.с⁻¹, l_0 - начальная длина рабочей части образца) с погрешностью $\pm 0,1\%$, а деформирующее напряжение $\sigma = P \cdot (1+\varepsilon) / S$ (S- сечение образца) с погрешностью $\pm 0,5 \cdot 10^4$ Па.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как было установлено [2], при деформации в сверхпроводящем состоянии (T=3,5 К) поликристаллов сплавов Pb-(20-55) ат. % In наблюдается нестабильность пластического течения в виде аperiодических скачков деформирующего напряжения малой амплитуды $\sim (1-10) \cdot 10^{-2}$ МПа.

В интервале температур (1,65- 4,2) К в отсутствии внешнего магнитного поля сплав Pb- 44 ат. % In находился в сверхпроводящем состоянии (критическая температура $T_{\text{кр}} \approx 6,75$ К). Для исключения влияния остаточного магнитного потока, который может возникать при механических испытаниях с циклической сменой нормального и сверхпроводящего состояний, деформация металла производилась всегда только в сверхпроводящем состоянии.

Анализ кривых деформационного упрочнения сплава Pb-44 ат. % In для температурного интервала (1,65-4,2) К позволил установить следующее: малоамплитудная скачкообразная деформация проявляется от предела текучести до предела прочности сплава, является функцией степени деформации.

Если для температур испытания $T > 3,5$ К имеет место однородная малоамплитудная скачкообразная деформация, то при $T < 3,5$ К и степенях относительного удлинения $\varepsilon > (10-20)\%$ на фоне малоамплитудной

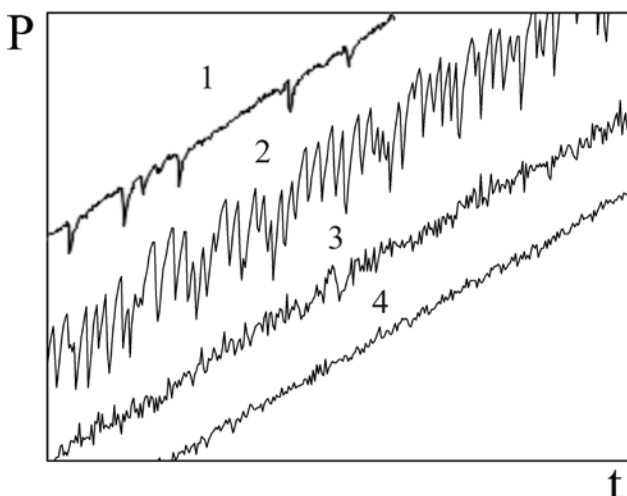


Рис.1 Участки кривых нагружения в координатах нагрузка P - время t поликристалла сплава Pb - 44 ат. % I в сверхпроводящем состоянии при температуре испытания T, К: 1- 3,95; 2- 3,75; 3- 2,5; 4- 2,0.

неустойчивости возникают скачки деформирующего напряжения, амплитуда которых в $\sim (10-30)$ раз больше.

Участки кривых нагружения в координатах нагрузка P - время t поликристалла сплава Pb-44 ат. % In для разных температур испытания при степени относительного удлинения меньше 10% показаны на рис.1. Понижение температуры деформирования приводит к изменению амплитуды скачков и частоты их следования при сохранении аperiодичности по их величине и времени возникновения.

Скачки нагрузки малой величины $\sim (10^{-1} - 1)$ Н (рис.1) отражают физические процессы, протекающие в сплавах системы Pb - In при заданных параметрах механических испытаний и не являются помехами в регистрирующей системе деформирующего устройства. Малоамплитудная скачкообразная деформация: не исчезает при кратковременном $\sim (10-30)$ с выключении системы откачки паров над жидким гелием, является функцией температуры испытания, концентрации индия в сплаве и степени деформации образца, а также подавляется возникновением нормальной фазы (смешанное и нормальное состояние).

В качестве характеристик, определяющих малоамплитудную неустойчивость пластического течения металла, использовали количество скачков $n_{\text{ск}}$ на 1% относительного удлинения и среднюю величину скачка $\delta\sigma_{\text{ск}}$ на интервале деформаций $\Delta\varepsilon \approx 0,75\%$. В диапазоне деформирующего напряжения от предела текучести до разрушения образца при общем количестве скачков $\sim (0,5-3) \cdot 10^3$ усреднение производилось по массиву $\sim (50-200)$ точек.

При температурах $T < 3,5$ К на малоамплитудную деформацию накладываются скачки большой амплитудой (различие в их величине составляет ~ 10 раз), вклад которых с увеличением ε существенно возрастает (рис.2).

Из рис.2, а-в следует, что вначале происходит развитие только малоамплитудной неустойчивости

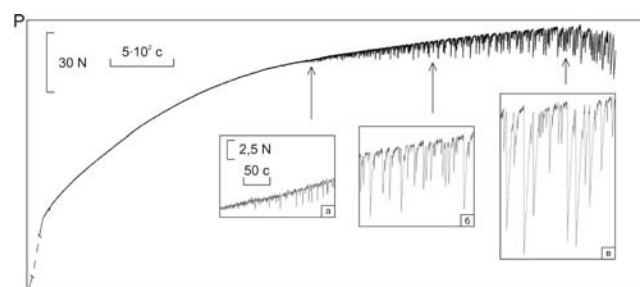


Рис.2 Ход кривой нагружения в координатах P-t сплава Pb - 44 ат. % In (T = 2,5 К; сверхпроводящее состояние).

На вставках (а - в) участки кривой P(t) с одновременным проявлением скачков малой и большой амплитуд.

пластического течения металла. Затем возникают скачки нагрузки большой амплитуды (на вставке рис.2,

а зафиксировано возникновение скачков большой амплитуды), которые с развитием деформации настолько увеличиваются, что вблизи предела прочности материала, не дают возможности проявиться малоамплитудной неустойчивости пластического течения.

Результаты разделения скачков малой и большой амплитуд при разных степенях относительного удлинения для кривой нагружения (рис. 2) приведены на рис.3, а-б. На начальном этапе деформирования возникают только скачки малой амплитуды. После достижения $\epsilon \geq 10\%$ на фоне малоамплитудной неустойчивости начинают проявляться скачки,

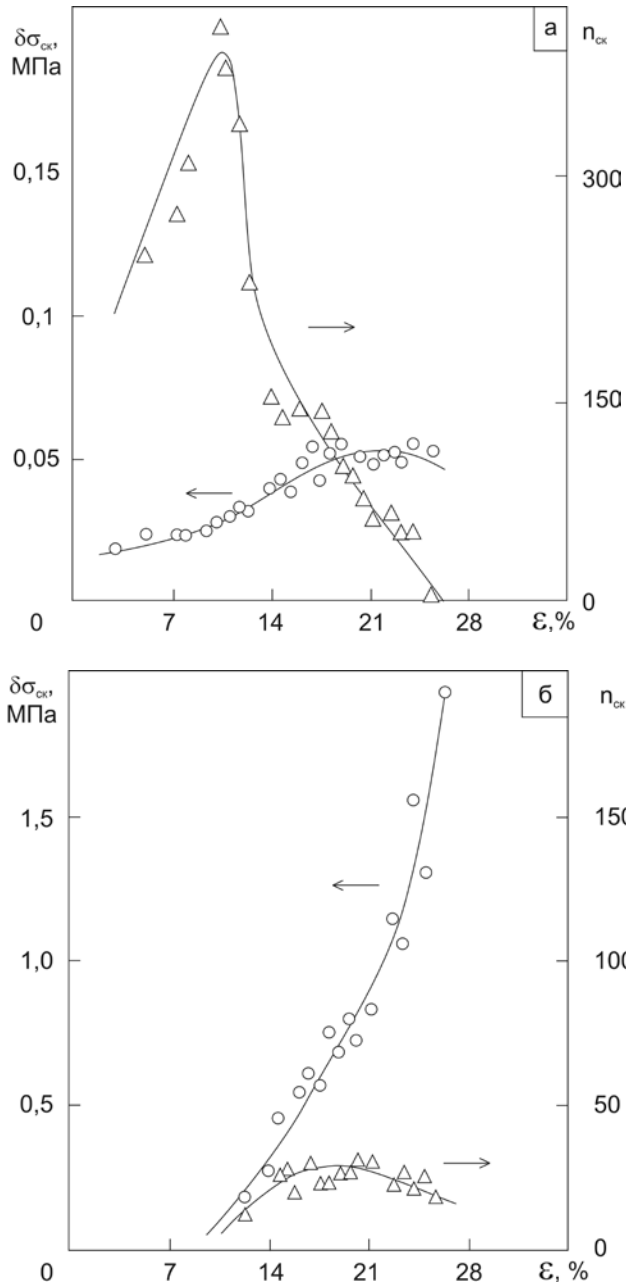


Рис.3 Зависимости $\delta\sigma_{ск}(\epsilon)$ (1,3) и $n_{ск}(\epsilon)$ (2,4) для скачков с малой (а) и большой (б) амплитудой (деформация сплава Pb- 44 ат. % In только в сверхпроводящем состоянии при $T=2,5$ К).

амплитуда которых в ~ 10 раз больше, а их концентрация в ~ 10 раз меньше. Если зависимости $n_{ск}(\epsilon)$ на рис. 3,а и 3,б подобны (соответственно для малых и больших скачков положение максимума при $\epsilon = 10\%$ и 20% и наибольшая концентрация скачков составляет 400 и 30), то характер изменения амплитуды скачка $\delta\sigma_{ск}$ от ϵ различен. Для скачков малой амплитуды в диапазоне $\epsilon = (2-28)\%$ величина $\delta\sigma_{ск}$ находится в пределах (0,015-0,05) МПа.

В случае скачков большой амплитуды зависимость $\delta\sigma_{ск}(\epsilon)$ характеризует при росте ϵ развивающуюся и становящуюся более интенсивной нестабильность пластического течения (конечная амплитуда увеличивается по сравнению с начальной на порядок).

Возникновение неустойчивости пластического течения в виде скачков малой и большой амплитуд можно связать с различным количеством дислокаций в группе, преодолевающих потенциальные барьеры разной мощности (отдельные атомы примеси, кластеры примесных атомов, выделения другой фазы).

В дальнейшем, будем рассматривать величину

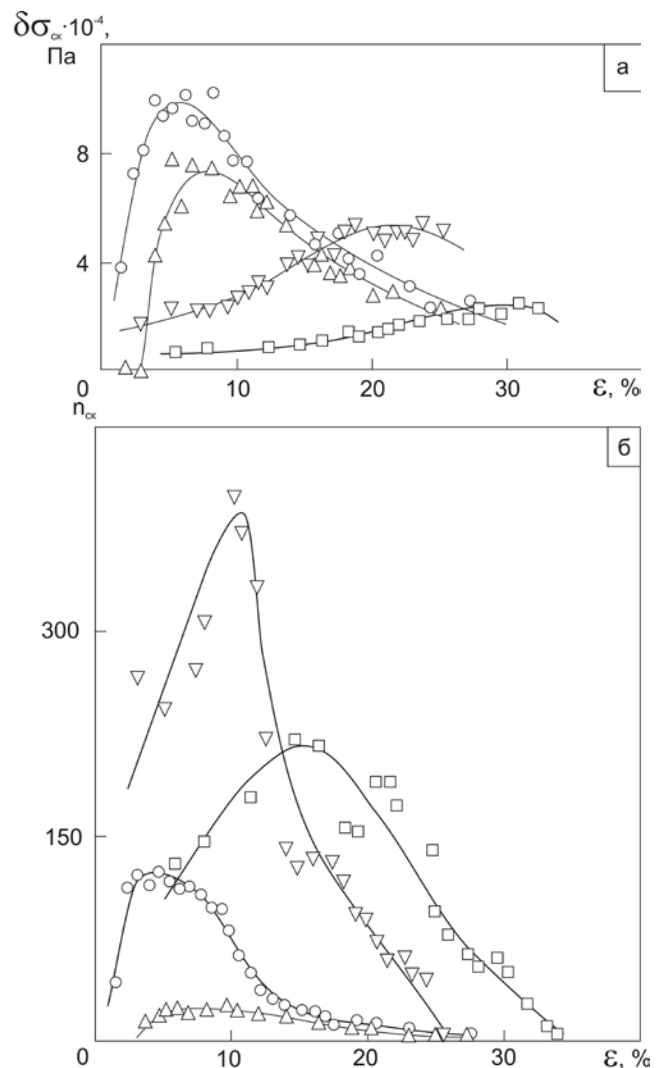


Рис.4. Изменение $\delta\sigma_{ск}$ и $n_{ск}$ от степени деформации и для температур испытания Т,К: 1-3,75; 2-3,95; 3-2,5; 4-2,0.

и динамику только малоамплитудных скачков в зависимости от ε и температуры деформирования металла.

На рис.4, а-б показано изменение амплитуды и концентрации скачков с увеличением степени относительного удлинения образца для некоторых температур деформирования. Приведенные зависимости $\delta\sigma_{ск}(\varepsilon)$ и $n_{ск}(\varepsilon)$ подобны и имеют колоколообразную форму. Положение максимума на этих кривых зависит от температуры деформирования.

Для построения температурных зависимостей измеренных величин использовали их усредненные значения для всего интервала деформаций. С этой целью рассчитывали средние значения $\langle\delta\sigma_{ск}\rangle = \sum\delta\sigma_{ск}^i / (\varepsilon_k - \varepsilon_n)$ и $\langle n_{ск}\rangle = N_{ск} / (\varepsilon_k - \varepsilon_n)$ для всего интервала деформаций $\langle\delta\sigma_{ск}\rangle \cdot 10^4$, Па $\langle n_{ск}\rangle$

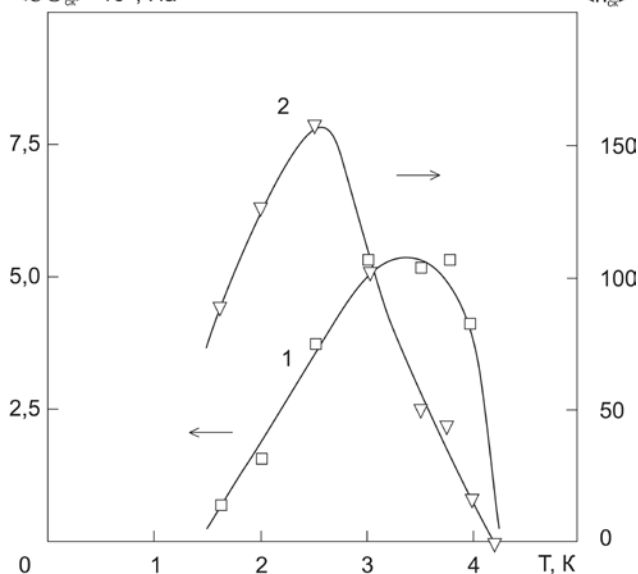


Рис.5 Температурная зависимость усредненных по всему интервалу деформаций величин скачка $\langle\delta\sigma_{ск}\rangle$ (1) и концентрации скачков $\langle n_{ск}\rangle$ (2) для сплава Pb - 44 ат.% In.

($\varepsilon_k - \varepsilon_n$), для которого наблюдали сбросы нагрузки (ε_n и ε_k - начало и конец проявления скачкообразной деформации, $\sum\delta\sigma_{ск}^i$ - сумма всех амплитуд и $N_{ск}$ - общее количество скачков).

Приведенные экспериментальные данные по температурной зависимости малоамплитудной скачкообразной деформации сплава Pb - 44 ат. % In позволяют выделить основные положения.

Малоамплитудная неустойчивость ($\langle\delta\sigma_{ск}\rangle = (0,1-5) \cdot 10^4$ Па) развивается на фоне общего однородного пластического течения металла (рис. 3). Это позволяет рассматривать деформацию металла как процесс с положительным коэффициентом деформационного упрочнения, на который накладывается локальное разупрочнение кристаллической решетки.

Локальное разупрочнение металла в объеме с линейным размером $l_{лок} = (V_{обр}/N_{ск})^{1/3} \approx (0,3-0,6)$ мм ($V_{обр}$ – объем рабочей части образца, $N_{ск}$ - общее количество

скачков) (рис.4) создается силовым (атермическим) преодоление потенциального барьера группой дислокаций $\Lambda = (10^2-10^3)$ [2].

Проявление малоамплитудной скачкообразной

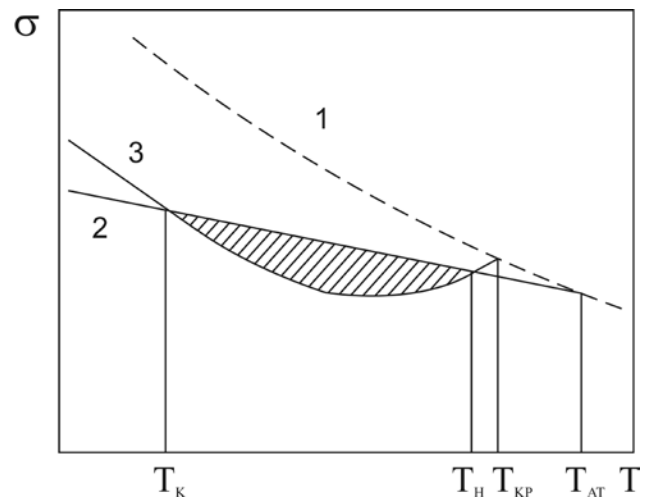


Рис.6 Ход (схема) температурных зависимостей деформирующего напряжения при термоактивируемом (1) и атермическом (2) механизмах движения дислокаций, а также величины разупрочнения при сверхпроводящем переходе (3).

деформации у сплава Pb - 44 ат.% In в узком интервале температур (1,65-4,2) К может быть связано с наличием и взаимодействием нескольких механизмов, контролирующих динамику дислокаций (рис.6).

В случае термоактивируемого преодоления дислокацией потенциального барьера температурный ход деформирующего напряжения определяется кривой (1) [4]. Однако, для ГЦК - кристаллов при низких температурах ($T_{ат} < 10\text{К}$) возможно проявление атермических механизмов движения дислокаций [4], что приводит к снижению уровню деформирующего напряжения до уровня кривой (2). Снижение уровня $\sigma(T)$ возможно также при переходе металла в сверхпроводящее состояние (разупрочнение в результате снижения концентрации нормальных электронов при $T < T_{кр}$) - кривая (3).

Для интервала температур от T_n до T_k происходит интерференция этих механизмов торможения дислокаций с преобладающим вкладом сверхпроводящего перехода. В этом случае снижение высоты потенциального барьера создает в статистически равномерно распределенных локальных объемах условия для облегченного перемещения дислокаций.

При $T < T_k$ уровень деформирующего напряжения будет определяться атермическим механизмом, а изменение вязкости электронного газа будет нивелироваться. В связи с этим создадутся условия для более интенсивного преодоления препятствий в нормальном состоянии металла.

1. В.В. Пустовалов. ФНТ **26**, 6,515 (2000).
2. В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, С.В. Савич. ФНТ **34**, 3, 300 (2008).
3. E.Y. Gutmanas, Y. Estrin, Phys. Status Solid (a) 92, 137 (1985).
4. В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. Металлургия, М. (1975). 275 с.