

УДК 538.945:539.214

PACS: 83.50.- v Деформация и течение материалов

83.60.Wc Нестабильность течения

Поверхностная локализация деформации и неустойчивое пластическое течение сплава Al -3%Mg

С.В. Лебедев, Д.В. Шведова

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4,
г. Харьков, 61077, Украина
sergey.v.lebedev@mail.ru*

Определены параметры неустойчивого пластического течения поликристаллического сплава Al -3%Mg ($T = 300$ K), проведено их сопоставление с характеристиками особенностей морфологии поверхности образца, которые связаны с возникновением полос локализованной деформации.

Ключевые слова: сплав, скачок деформирующего напряжения, прирост удлинения образца, полоса локализованной деформации.

Визначено параметри нестійкої пластичної течії полікристалічного сплаву Al -3% Mg ($T = 300$ K), проведено їх зіставлення з характеристиками особливостей морфології поверхні зразка, які пов'язані з виникненням смуг локалізованої деформації.

Ключові слова: сплав, стрибок деформуючого напруження, приріст подовження зразка, смуга локалізованої деформації.

The parameters of the unstable plastic flow of polycrystalline alloy Al -3% Mg ($T = 300$ K), and compared with performance characteristics of the surface morphology of the sample that are associated with the appearance of bands of localized deformation.

Keywords: fusion, jump flow stress, elongation growth of the sample, a band of localized deformation.

Введение

В предыдущих работах [1,2] было показано, что деформация сплава Al -3%Mg в диапазоне как гелиевых, так и комнатных температур сопровождается неустойчивым пластическим течением в виде скачков деформирующего напряжения. Определение характеристик скачкообразной деформации (амплитуда скачка, концентрация скачков и удлинение образца при единичном скачке нагрузки) в зависимости от параметров эксперимента позволило показать, что пластическое течение сплава определяется высоким уровнем механических напряжений в кристаллической решетке (атермическая деформация).

При наличии высокого уровня механических напряжений возможно возникновение зон сильнонеравновесных состояний, что приводит к возникновению дефектов различных масштабных уровней за счет реализации механизмов локальных структурных и структурно-фазовых превращений [3].

В настоящее время скачкообразная деформация

ряда металлов и сплавов в диапазоне комнатных температур связывается: с откреплением дислокаций от атомов примесей и их скоплений, образованием полос (участков) локализованного сдвига, переориентацией кристаллической решетки в процессе двойникования . протеканием фазовых превращений и др.

Поскольку конкретный механизм явления скачкообразной деформации по-прежнему остается до конца не выясненным, то для его установления необходимы дальнейшие эксперименты (например, изучение структурных искажений и др.).

В связи с этим в данной работе проведено дальнейшее изучение параметров скачкообразной деформации и их сопоставление с морфологией поверхности деформированного сплава Al -3%Mg.

Объект и методика эксперимента

Изучали промышленный сплав Al -3%Mg (размер зерна $< 0,1$ мм). Образцы с плоскопараллельной рабочей частью ($0,77 \times 4 \times 15$) мм³ деформировали растяжением со скоростью $v_{шт} = 4$ мкм.с⁻¹ при температуре 300

К. Диаграмму растяжения в координатах нагрузка P – время t регистрировали электронным потенциометром КСП-4 (временное разрешение ~ 1 с) и цифровым мультиметром Sanwa PC-520 M (временное разрешение $\sim 0,3$ с).

Относительное удлинение рассчитывали по соотношению $\varepsilon = v_{шт} \cdot t/l$ (l – длина рабочей части образца) с погрешностью $\pm 0,1\%$, деформирующее напряжение – по соотношению $\sigma = P \cdot (1 + \varepsilon)/S$ (S – начальное сечение образца) с погрешностью $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ МПа. Приращение длины образца рассчитывали из $\delta l_{ск} = v_{шт} \cdot \delta t_{ск}$ ($\delta t_{ск}$ – временной интервал между скачками) с погрешностью ± 1 мкм.

В качестве характеристик неустойчивого пластического течения сплава использовали усредненные по интервалу деформаций $\Delta \varepsilon = (0,5 - 0,75)\%$ амплитуду скачка $\delta \sigma_{ск}$, удлинение образца $\delta l_{ск}$ и концентрацию скачков $n_{ск}$ на 1% относительного удлинения.

Экспериментальные результаты

Как было показано ранее [1,2], деформация сплава Al-3%Mg в интервале температур (210 – 350) К на фоне общего деформационного упрочнения сопровождается неустойчивостью пластического течения, которая проявляется в виде аperiодических сбросов деформирующего напряжения переменной амплитуды.

На рис.1 показана кривая деформационного упрочнения промышленного сплава Al-3%Mg в координатах нагрузка P – время t .

Характерным для кривой $P(t)$ является

возникновение скачков нагрузки $\delta P_{ск}$ сразу же после достижения предела текучести P_0 , дальнейшее их увеличение по мере деформирования образца таким образом, что при средних и больших временах растяжения $\delta P_{ск}$ достигает (1-10)% от уровня P . На вставке рис.1 показано определение скачка нагрузки $\delta P_{ск}$ и времени между скачками $\delta t_{ск}$.

В дальнейшем для анализа параметров скачкообразной деформации был произведен пересчет: диаграммы $P(t)$ в кривую деформационного упрочнения $\sigma(\varepsilon)$, $\delta P_{ск}$ в амплитуду скачка деформирующего напряжения $\delta \sigma_{ск}$, а $\delta t_{ск}$ в приращение удлинения образца $\delta l_{ск}$.

Изменение характеристик неустойчивого пластического течения $\delta \sigma_{ск}$, $n_{ск}$ и $\delta l_{ск}$ в зависимости от степени относительного удлинения ε показано на рис.2.

Как следует из рис.2, $\delta \sigma_{ск}$ возрастает от 1 МПа до 10 МПа (а), а $\delta l_{ск}$ – от 1 мкм до 30 мкм (в) по линейному закону от ε ; а зависимость $n_{ск}(\varepsilon)$ имеет колоколообразную форму с тенденцией спада концентрации скачков от 23 до 9 (б).

Оценка количества дислокаций, которые дают вклад в удлинение образца на $\delta l_{ск}$ при каждом скачке деформирующего напряжения, составляет $\Lambda \approx \delta l_{ск}/b$ (вектор Бюргерса $b \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м). В диапазоне $\varepsilon = (1 - 20)\%$ Λ составит $\sim (3 \cdot 10^4 - 10^5)$ дислокаций, что при сечении образца $S \approx 3 \cdot 10^{-6}$ м² соответствует снижению общей плотности линейных дефектов на $\delta N_{ск}^{-1} \sim (1 - 3) \cdot 10^{10}$ м⁻². Приведенная оценка $\delta N_{ск}^{-1}$ составляет весьма малую долю от общей плотности дислокаций $N_d \sim 10^{14}$ м⁻² при деформациях сплава $\varepsilon \sim (10-20)\%$.

Изменение плотности дислокаций в объеме

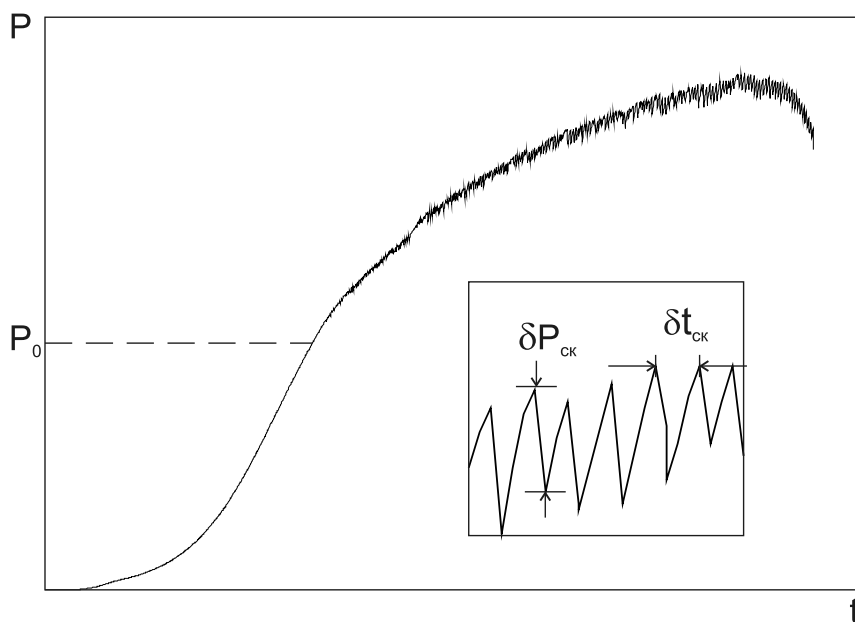


Рис.1 Кривая деформационного упрочнения в координатах нагрузка P – время t сплава Al-3%Mg. На вставке участок зависимости $P(t)$ в увеличенном масштабе ($\delta P_{ск}$ – амплитуда скачка, $\delta t_{ск}$ – время между скачками).

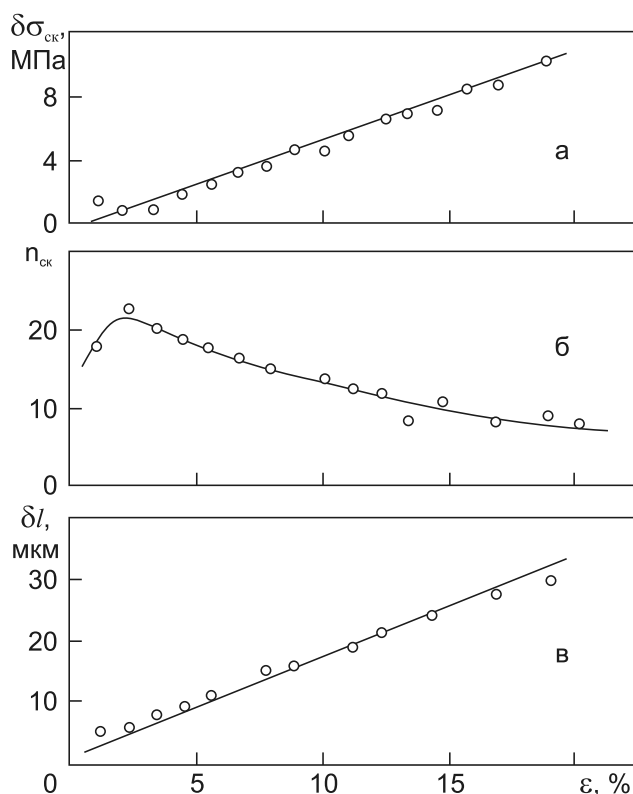


Рис.2 Зависимость амплитуды скачка $\delta\sigma_{ск}$ (а), концентрации скачков $n_{ск}$ (б) и удлинения образца $\delta l_{ск}$ (в) от степени относительного удлинения ε .

образца может быть также произведено по соотношению $\delta N_{ск}^2 \sim (\delta\sigma_{ск} / \alpha \cdot G \cdot b)^2$ [4]. Для $\alpha \approx 0,5$, при модуле сдвига $G \approx 3 \cdot 10^{10}$ Па и $\delta\sigma_{ск} = (1-10)$ МПа снижение плотности дислокаций составит $\delta N_{ск}^2 \sim (4 \cdot 10^{10} - 4 \cdot 10^{12}) \text{ м}^{-2}$, что также гораздо меньше общей плотности $N_d \sim 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

Существенное различие верхних значений $\delta N_{ск}^2 / \delta N_{ск}^1 \sim 10^2$ может быть скорректировано в предположении того, что все изменения в плотности дислокаций происходят не в объёме образца, а в приповерхностном слое толщиной $\ll 10^{-1}$ мм.

Для установления влияния скачкообразной деформации на структурные состояния в сплаве Al-3%Mg на первом этапе исследований было рассмотрено состояние его поверхностного слоя. На фотографии (рис.3) показано изображение одной из боковых поверхностей образца сплава Al-3%Mg после деформирования до образования сужения рабочего сечения на уровне предела прочности.

Качественный анализ морфологии боковой поверхности (рис.3) позволил выделить следующие положения:

- скачкообразная деформация приводит к возникновению линейных участков более интенсивной деформации (полосы сброса);
- полосы локализованной деформации проходят от одного края боковой поверхности до другого ее

края через все зерна поликристаллической структуры образца;

- ориентация пересекающихся полос по отношению оси растяжения (оси приложения нагрузки) составляет углы $\sim 45^\circ$ и $\sim 135^\circ$, что может быть связано с возникновением сдвиговых напряжений достаточно высокого уровня;

- при используемом масштабе изображения поверхности тонкая структура этих полос - неразличима;

- в предположении того, что одиночный скачок $\delta\sigma_{ск}$ создает один участок интенсивной пластической деформации и эти участки равномерно заполняют обе боковые поверхности длиной $l = 15$ мм, его ширину можно оценить как $\delta l_{ск} \sim 2 \cdot l / N \sim 120$ мкм (суммарное количество скачков $N = 250$, см. рис.2,б), что соответствует коэффициенту заполнения 1:6 (рис.2,в).



Рис.3 Изображение поверхности образца сплаве Al-3%Mg ($T = 300$ К, $\varepsilon = 20$ %) с характерными линейными участками локализации деформации.

Подобные полосы локализации деформации (микронного и субмикронного масштаба) наблюдали также на поверхности дуралюмина [5], а также на образцах композитного материала $\text{Al}+10\%\text{Al}_2\text{O}_3$ [6]. Согласно [7] при этом реализуется механизм деформации, обусловленный нелинейной волной локальных структурных превращений в поверхностном слое металла на мезомасштабном уровне.

На основании приведенных результатов можно смоделировать возникновение и кинетику неустойчивого пластического течения сплава.

На начальном этапе при высоком уровне дефектности кристаллической решетки и наличии концентраторов механических напряжений на краях боковой поверхности образца происходит перераспределение нормальных (растягивающих)

компонет деформирующего напряжения на две сдвиговые составляющие.

В дальнейшем, эти составляющие производят локализованный сдвиг на поверхности образца с соответствующей разрядкой механических напряжений на концентраторах.

Таким образом, в приведенной схеме первичным является образование поверхностного локализованного сдвига, который увеличивает эффективную длину образца и, как следствие, снижению уровня приложенной нагрузки и фиксации этого как скачка деформирующего напряжения на кривой деформационного упрочнения.

Поскольку волна локализованно сдвига затрагивает поверхностные слои, то образовавшие его дислокации не вносят существенно вклада в изменение общей объемной плотности дислокаций.

Тогда, как уже отмечалось [1,2], ход кривой деформационного упрочнения со скачками деформирующего напряжения (рис.1) может свидетельствовать о протекании двух независимых процессов: однородного течения большей части образца и неоднородного течения в локализованных его объемах.

1. В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, С.В. Савич. Вісник ХНУ. Серія: Фізика **651**, в.8, 140 (2005).
2. С.В. Лебедев, С.В. Савич. Вісник ХНУ. Серія: Фізика **915**, в.14, 91 (2010).
3. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Физ. мезомеханика **14**, №3, 7 (2011).
4. Ж. Фридель. *Дислокации*, ИЛ, М. (1967).
5. П.В. Кузнецов, В.Е. Панин. Физ. мезомеханика **3**, №2, 91 (2000).
6. Е.Е. Дерюгин, В.Е. Панин, З. Шмаудер, И.В. Стороженко. Физ. мезомеханика **4**, №3, 35 (2001).
7. Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.А. Баранников. *Физика макролокализации пластического течения*, Наука, Новосибирск (2008).