

PACS numbers: 61.72.Ff, 61.72.Hh, 61.72.Mm, 62.20.fq, 62.23.St, 81.40.Lm, 83.50.-v

## Создание наноструктурного сверхпластичного состояния в сплавах на основе алюминия

М. М. Мышляев, М. М. Кулак\*, Е. Г. Пашинская\*\*

*Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН,  
Ленинский проспект, 49,  
119991 Москва, Россия*

*\*Институт технической акустики НАН Беларуси,  
просп. Людникова, 13,  
210023 Витебск, Беларусь*

*\*\*Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины,  
ул. Р. Люксембург, 72,  
83114 Донецк, Украина*

Изучены особенности механического и структурного поведения в процессе сверхпластичного (СП) течения в сплаве на основе алюминия. Установлено, что стационарная деформация СП-течения реализуется при структурном состоянии в объеме материала, которому отвечает динамическая стационарность характеристик элементов структуры. Показано, что СП-течение на стадии «упрочнения» реализуется за счёт дислокационного скольжения внутри зерен, а на стадии «разупрочнения» оно осуществляется по механизму скольжения по границам зёрен.

Вивчено особливості механічної й структурної поведінки в процесі надпластичного (НП) плину в стопі на основі алюмінію. Встановлено, що стаціонарна деформація НП-плину реалізується при структурному стані в об'ємі матеріалу, якому відповідає динамічна стаціонарність характеристик елементів структури. Показано, що НП-плин на стадії «зміцнення» реалізується за рахунок дислокаційного ковзання усередині зерен, а на стадії «знеміцнення» він здійснюється за механізмом ковзання по межах зерен.

Features of mechanical and structural behaviour of aluminium-based alloy during the superplastic-flow process are studied. As revealed, the stationary superplastic-flow deformation is realized at the structural state in the bulk of material, to which the dynamic stationarity of characteristics of structure elements corresponds. As shown, at the stage of 'hardening', the superplastic flow is realized due to dislocation slip within the grains, while, at the 'softening' stage, it is implemented by the mechanism of grain-boundary slip.

**Ключевые слова:** механизмы деформации, структура, сверхпластичность, упрочнение, разупрочнение.

*(Получено 29 января 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внимание исследователей и технологов все в большей степени привлекает вопрос о повышении сверхпластичности (СП) материалов. Её промышленное использование требует совершенствования методов создания мелкозернистого и/или наноструктурного (НС) состояния в материалах, с одной стороны, и понимания механизмов, обеспечивающих максимальное проявление СП, с другой. Это требует всестороннего изучения структуры материалов и её поведения в ходе СП-деформации. Данная работа посвящена созданию НС-состояния в алюминиевых сплавах и выяснению механизмов пластической деформации, отвечающих сверхпластичному течению в материале.

## 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Опыты выполнены на СП алюминиевом сплаве Al–5,5% Mg–2,2% Li–0,12% Zr. СП в его обычном состоянии (размер зёрен около 10 мкм) отвечает деформация до разрушения  $\epsilon = 350\%$  и коэффициент скоростной чувствительности напряжения  $m = 0,45$  при деформации растяжением со скоростью  $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  при  $480^\circ\text{C}$  [1, 2].

НС-состояние в сплаве формировали последовательным десятикратным равно-канальным прессованием (РКУП) при  $370^\circ\text{C}$  по методике, изложенной в [3]. Структуру изучали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ) в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Образцы для ПЭМ приготавливали по методике, описанной в [4]. Подробное описание ДОРЭ анализа изложено в [5]. Из прессованных прутков изготавливали плоские образцы для механических испытаний на растяжение. Методики изготовления образцов и проведения испытаний описаны в [3].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Структурное состояние РКУ прессованных прутков

Данному состоянию отвечала зёрненная структура. Как правило, зерна были равноосные. В них наблюдались субзёрна, дислокации, и их ячейки и сплетения. Часто встречались разорванные и обор-

**ТАБЛИЦА 1.** Соотношение между малоугловыми и высокоугловыми границами.

Сечения	Доля МУ-границ	Доля ВУ-границ
Поперечное	0,20	0,80
Продольное	0,13	0,87
	Доля МУ-границ	
	$\theta < 5^\circ$	$\theta \leq 5^\circ$
Поперечное	0,80	0,20
Продольное	0,79	0,21

ванные границы субзёрен. При просмотре структуры наблюдались движение дислокаций и миграция границ субзёрен.

Были получены статистические данные о размерах зёрен ( $D$ ), разориентации зёрен ( $\theta_z$ ) и субзёрен ( $\theta_{cs}$ ), отвечающих поперечному и продольному сечениям прутка. Первому отвечают средние значения  $D = 1,49$  мкм,  $\theta_z = 37,77^\circ$  и  $\theta_{cs} = 3,44^\circ$ ; второму —  $D = 1,37$  мкм,  $\theta_z = 40,21^\circ$  и  $\theta_{cs} = 3,29^\circ$ .

В таблице 1 приведены данные по соотношению между малоугловыми (МУ) и высокоугловыми (ВУ) границами разориентации элементов структуры в указанных сечениях прутка.

Из приведенных данных видно, что для обоих сечений значения характеристик структурных элементов близки, что свидетельствует об однородности структурного состояния в объёме материала.

### 3.2. Механическое поведение образцов из РКУ прессованных прутков

Растяжение образцов проводили при оптимальной для СП-течения температуре  $370^\circ\text{C}$  и скорости деформации  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Наибольшее значение деформации до разрушения составило  $\sim 1900\%$ .

На рисунке 1 приведена диаграмма, «истинное напряжение  $\sigma$ – истинная деформация  $\epsilon$ ». Видно, СП-течению отвечают две стадии: за стадией «упрочнения» следует стадия «разупрочнения».

Проведенный анализ показал, что стадии «упрочнения» отвечает скорость деформации  $\epsilon \approx 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  и энергия активации, равная энергии самодиффузии в зёрнах, а стадии «разупрочнения» отвечает  $\epsilon = 10^{-3} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и энергия активации, соответствующая энергии самодиффузии по границам зёрен и зернограничному проскальзыванию.

Тогда, согласно приведенным и литературным данным, СП-течение на стадии «упрочнения» реализуется за счёт дислокационного скольжения внутри зёрен [6, 7], а на стадии «разупрочнения» оно осуществляется по механизму скольжения по границам зёрен [8, 9].

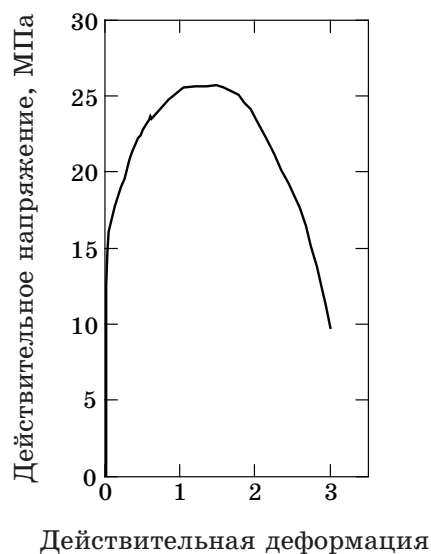


Рис. 1. Зависимость истинного напряжения от истинной деформации.

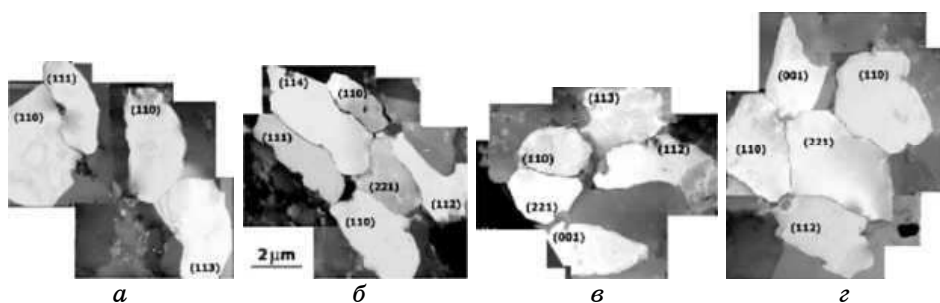


Рис. 2. Темнопольные изображения зеренной структуры. Для некоторых зерен указаны индексы осей зон. Деформация: 110% (а), 300% (б), 900% (в), 1200% (г).

### 3.3. Поведение структуры при СП-течении образцов из РКУ прессованных прутков

Исследование показало, что на стадии «упрочнения» происходит непрерывная реорганизация структуры в каждом локальном объеме образца при преобладании процессов деформационного упрочнения над процессами динамического возврата и при активном дислокационном скольжении в зернах. В результате зёрна становятся вытянутыми.

В ходе дальнейшего СП-течения постепенно зёрна становились практически глобулярными. Такая структура характерна для ста-

ТАБЛИЦА 2. Влияние деформации на характеристики структуры.

Характеристики структуры	Деформация, %			
	0	100	500	1200
$D$ , мкм	1,49	2,03	2,06	2,07
$\theta_s$ , градусы	37,77	38,06	38,49	40,04
$\theta_{cs}$ , градусы	3,44	2,99	2,93	2,65

дии «разупрочнения» и отвечает СП-течению посредством зернограничного скольжения. Эволюцию структуры иллюстрирует рис. 2.

Были получены статистические данные о характеристиках структуры, отвечающие разным степеням деформации на стадиях «упрочнения» и «разупрочнения». Их средние значения приведены в табл. 2. Видно, что деформация при СП-течении практически не влияет на характеристики структурных элементов.

Из приведенных данных следует, что стационарность деформации СП-течения в материале реализуется при структурном состоянии в объеме материала, которому отвечает динамическая стационарность характеристик элементов структуры.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что растяжение при температуре 370°C и скорости деформации  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$  образцов алюминиевого сплава Al–5,5% Mg–2,2% Li–0,12% Zr, находящегося в наноструктурном состоянии после РКУП, приводит к сверхпластичности. Установлено, что СП-течению отвечают две стадии: стадия «упрочнения» и стадия «разупрочнения». На стадии «упрочнения» происходит непрерывная реорганизация структуры в каждом локальном объеме образца при преобладании процессов деформационного упрочнения над процессами динамического возврата и при активном дислокационном скольжении в зернах. Стадии «разупрочнения» отвечает механизм скольжения зерен.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и ДФФД Украины.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. I. N. Fridlyander, N. I. Kolobnev, L. V. Khokhlatova, and E. Yu. Semyonova, *Aluminium*, 5, No. 11: 21 (1990).
2. И. Я. Новиков, В. К. Портной, И. Л. Константинов, Н. И. Колобнев, *Металловедение алюминиевых сплавов* (Москва: Наука: 1985).
3. М. М. Мышляев, В. В. Шпейзман, М. М. Камалов, *ФТТ*, 43, № 11: 2015 (2001).
4. С. П. Беляев, В. А. Лихачев, М. М. Мышляев, О. Н. Сеньков, *ФММ*, 52, № 3:

- 617 (1981).
5. B. L. Adams, S. I. Wright, and K. Kunze, *Met. Trans. A*, **24A**: 819 (1993).
  6. В. А. Лихачев, М. М. Мышляев, О. Н. Сеньков, *Проблемы механики деформируемого твердого тела: Межвузовский сборник* (Ленинград: ЛГУ: 1982), № 14, с. 179.
  7. V. A. Likhachev, M. M. Myshlyayev, O. N. Sen'kov, and C. A. Liverore, *Lawrence Livermore National Laboratory* (1987), p. 1.
  8. М. Х. Рабинович, О. А. Кайбышев, В. Г. Трифонов, *МиТОМ*, № 9: 58 (1981).
  9. О. А. Кайбышев, *Сверхпластичность промышленных сплавов* (Москва: Металлургия: 1984).