

**М. Н. Ситкина\*, О. А. Яковцева, А. Д. Котов**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет — МИСиС», г. Москва

\*mariia\_sitkina@mail.ru

Научный руководитель — доц., канд. техн. наук А. В. Михайловская

## **МЕХАНИЗМЫ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ**

Определена оптимальная скорость  $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  высокоскоростной деформации сплава системы Al–Zn–Mg–Cu с добавками Ni и Zr при температуре 440 °С, которая обеспечивает относительное удлинение более 600 %. Доля вкладов механизмов сверхпластической деформации остается постоянной как на начальной стадии, так и на стадии установившегося сверхпластического течения. Основными механизмами при деформации являются диффузионная ползучесть, вклад которой достигает 40 %, и зернограничное скольжение, вклад которого около 30 %.

*Ключевые слова:* сверхпластичность, алюминиевые сплавы, механизмы сверхпластической деформации, зернограничное скольжение, внутризеренная деформация.

**M. N. Sitkina, O. A. Yakovtseva, A. D. Kotov**

## **MECHANISMS OF SUPERPLASTIC DEFORMATION AT THE HIGH STRAIN RATE**

The strain rate  $1-10^{-2} \text{ s}^{-1}$  of high-speed deformation at a temperature of 440 °C of the Al–Zn–Mg–Cu alloy with Ni and Zr is determined, which provides an elongation of more than 600 %. The contribution of the mechanisms of superplastic deformation remains constant both at the initial stage and at the stage of steady superplastic flow. The main mechanisms of deformation are diffusion creep, whose contribution reaches 40 %, and grain boundary sliding, whose contribution is about 30 %.

*Key words:* superplasticity, aluminum alloys, mechanisms of superplastic deformation, grain boundary sliding, intragranular deformation.

**С**верхпластическая формовка (СПФ) алюминиевых сплавов занимает особое место в современной аэрокосмической промышленности [1–3].

Основным достоинством СПФ является возможность изготовления сложных деталей за один технологический проход при воспроиз-

ведении даже мелкого рельефа поверхности [4]. С точки зрения повышения эффективности формовки и минимизации энергетических затрат наибольший интерес представляют сплавы, способные к сверхпластической деформации при высоких скоростях и низких напряжениях [5, 6]. К таким сплавам относят сплавы с матричной структурой на базе системы Al–Zn–Mg–Cu.

Широко используется известный сплав AA7475 [7, 8], однако свойства конечных изделий сильно снижаются за счет остаточной пористости после СПФ. Известно, что во время сверхпластической деформации в сплаве основным механизмом является зернограничное скольжение, вклад которого составляет более чем 50 %, за счет чего развивается сильная пористость. Аккомодационную роль играет диффузионная ползучесть.

Существуют сплавы той же системы Al–Zn–Mg–Cu, способные к сверхпластической деформации с малой остаточной пористостью и высокими механическими свойствами после формовки. Однако их действующие механизмы деформации и особенности микроструктуры при высоких скоростях и степенях деформации не освещены в литературе.

Целью работы являлось определение вкладов действующих механизмов в общую деформацию в сплаве: Al–4Zn–4Mg–1Cu–3Ni–0,3Zr. Лист толщиной 1 мм получали в лабораторных условиях. Для деформации использовали образцы с размерами рабочей части 14x6 мм.

Сплав содержит когерентные матрицы дисперсные частицы фазы Al<sub>3</sub>Zr размером около 0,8 мкм и равномерно распределенные Al<sub>3</sub>Ni — 3 мкм.

После испытаний с постоянной скоростью деформации при температуре 440 °С построены графики зависимости напряжения течения от степени деформации (рис. 1). Выбрана оптимальная скорость деформации  $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , которая позволяет получить относительное удлинение более 600 % (степень деформации 2,0).

Для изучения механизмов сверхпластической деформации и определения их вкладов в общее удлинение сплава на поверхность образцов наносили маркерные сетки при помощи ионного микроскопа «STRATA FIB 205». Размер маркерных сеток: 100×100 мкм с шагом 4 и более мелким — 1,5 мкм. Сплав характеризуется нерекристаллизованной структурой перед началом деформации, поэтому сетки наносились на предварительно деформированный образец до степени 1,1.

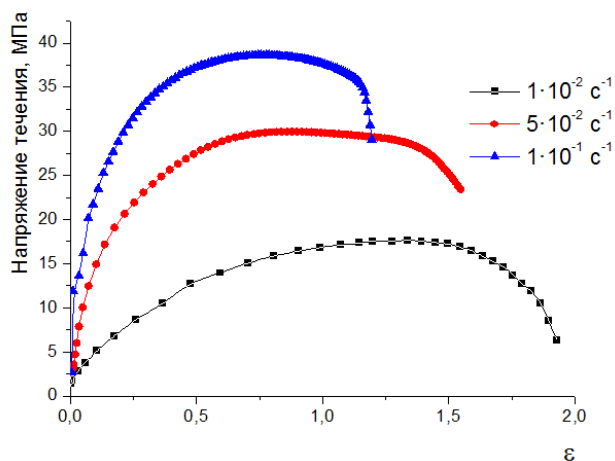


Рис. 1. Кривые растяжения сплава Al–4Zn–4Mg–1Cu–3Ni–0,3Zr при температуре 440 °С и разных скоростях деформации

Образцы с сетками подвергали последовательной деформации с шагом 25 % при выбранном температурно-скоростном режиме на разрывной машине «*Walter Bay 100 N*» в атмосфере аргона для защиты поверхности от окисления. На каждой ступени деформации поверхность образцов рассматривали в электронном сканирующем микроскопе. На рис. 2 приведены поверхность с исходной сеткой после 1,1 и изменение поверхности образца после деформации до степени 1,88 со скоростью  $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  при температуре 440 °С.

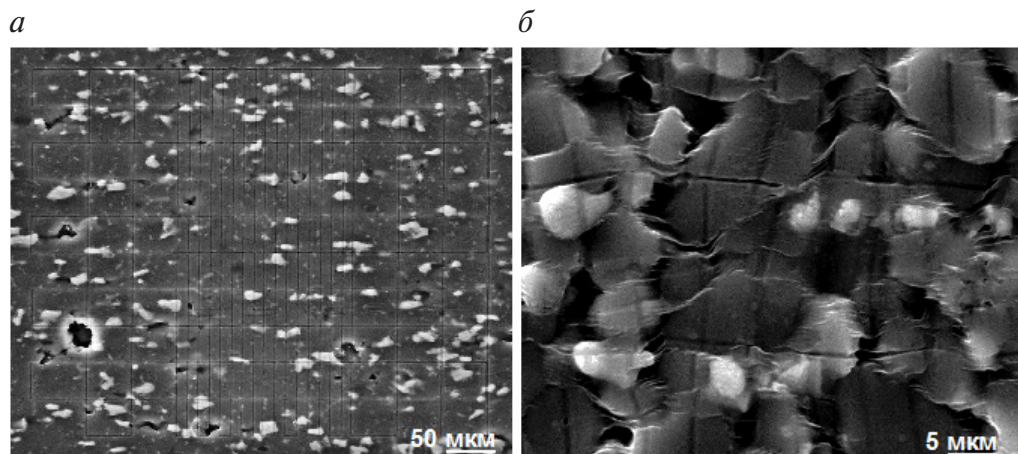


Рис. 2. Поверхность образцов с маркерными сетками:

*а* — перед сверхпластической деформацией (степень деформации 1,1), *б* — после деформации со скоростью  $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  и при температуре 440 °С (степень деформации 1,88)

Качественно поверхность образцов не меняется во время деформации. В процессе сверхпластического течения линии маркерных сеток смещаются по межзеренным границам, что говорит о действии зернограницного скольжения, зерна разворачиваются (рис. 2), при этом угол разворота увеличивается с увеличением степени деформации.

Вклад зернограницного скольжения рассчитывался по измерению смещений линий сеток в процессе последовательной деформации. Для определения доли внутризеренной деформации была нанесена более мелкая сетка, позволяющая проводить измерения изменения расстояния линий в пределах одного зерна. На поверхности наблюдается образование широких складчатых зон, которые считаются признаком диффузионной ползучести, по изменению ширины таких зон рассчитан вклад диффузионной ползучести в общее удлинение.

В результате проведенных расчетов наибольший вклад в деформацию вносит диффузионная ползучесть, значение вклада достигает 40 %, из чего можно сделать вывод, что диффузионная ползучесть является основным механизмом. Зернограницное скольжение играет аккомодационную роль, вклад не превышает 30 % перед разрушением. Внутризеренное дислокационное скольжение несущественно и составляет 4–5 %, линии маркеров практически не смещаются в пределах одного зерна и не размываются при деформации. Неосновная роль зернограницного скольжения обеспечивает малую пористость в процессе сверхпластического течения, объемная доля пор не превышает 1,5 %.

Следовательно, особое сочетание высокого вклада диффузионной ползучести и более низкого зернограницного скольжения в процессе сверхпластической деформации сплава Al–Zn–4Mg–1Cu–3Ni–0,3Zr позволяет получать высокие относительные удлинения и минимальную пористость.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента № МК-2301.2017.8.*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Liu F. C., Ma Z. Y. Contribution of grain boundary sliding in low-temperature superplasticity of ultrafine-grained aluminum alloys // Scripta Materialia. 2010. V. 62. P. 125–128.
- 2 Mukhopadhyay A. K., Reddy G. M. Influence of trace addition of Ag on the weldability of Al-Zn-Mg-Cu-Zr based 7010 alloy // Materials Science Forum. 2002. V. 3. P. 396–402.
- 3 Chen Z. P., Chen Z. P. A study of post-form static and fatigue properties of superplastic 7475-SPF and 5083-SPF aluminium alloys // Journal of Materials Processing Technology. 2004. V. 148. P. 204.

- 4 Subash V., Karthikeyan P. A study on superplastic forming of aluminium alloy 2024 and its metallurgical characterization // International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE). 2016. V. 22. P. 467–471.
- 5 Sotoudeh K., Bate P. S. Diffusion creep and superplasticity in aluminium alloys // Acta Materialia. 2010. V. 58. P. 1909–1920.
- 6 Grimes R. Superplastic forming of aluminium alloys // Woodhead Publishing Limited. 2011. P. 247–271.
- 7 Portnoy V. K., Novikov I. I. Evaluation of grain boundary sliding contribution on the total strain during superplastic deformation // Scripta Materialia. 1999. V. 40. P. 39–43.
- 8 Chen C. L., Tan M. J. Cavity growth and filament formation of superplastically deformed Al 7475 Alloy // Materials Science and Engineering. 2001. V. 298. P. 235–244.