

УДК 669.017

**М. Н. Ситкина<sup>\*</sup>, О. А. Яковцева, Р. Ю. Барков, О. И. Мамзурина**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва*\*sitkina.m@misis.ru*

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

**ПОКАЗАТЕЛИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ  
ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВЕ Al–Zn–Mg–Ni–Zr–Sc**

Определены показатели сверхпластичности в сплаве системы Al–Zn–Mg с добавками Ni, Zr, Sc. Сплав демонстрирует удлинения более 700 % в интервале высоких скоростей сверхпластической деформации  $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  при температуре 440 °С.

*Ключевые слова:* сверхпластичность, алюминиевые сплавы, дислокационная структура, нерекристаллизованная структура

**M. N. Sitkina, O. A. Yakovtseva, R. Yu. Barkov, O. I. Mamzurina****SUPERPLASTIC BEHAVIOR AT HIGH STRAIN RATE  
IN Al–Zn–Mg–Ni–Zr–Sc ALLOY**

The superplastic behaviour is determined in the alloy of the Al–Zn–Mg system with Ni, Zr, and Sc additives. The alloy exhibit elongations more than 700 % in the range of high superplastic deformation strain rates of  $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  at the temperature of 440 °С.

*Key words:* superplasticity, aluminum alloys, dislocation structure, unrecrystallized structure

**В** настоящий момент на производстве часто используется достаточно дешевый сплав AA7475 [1], который обладает удовлетворительными механическими свойствами. Сплав относится к системе Al–Zn–Mg–Cu и широко применяется для сверхпластической формовки [2]. Скорость формовки деталей из AA7475 невысока и находится в интервале  $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  [3–4]. Такие низкие скорости формообразова-

ния требуют не только больших временных затрат, но и затрат на электроэнергию, что экономически невыгодно. С точки зрения повышения эффективности формовки интерес представляют сплавы, проявляющие сверхпластичность при более высоких скоростях [5], оптимальным является увеличение скорости на несколько порядков:  $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

В работе [6] получен сплав той же системы, что и AA7475 (Al–Zn–Mg–Cu), дополнительно легированный эвтектикообразующими элементами Fe и Ni, а также Zr и Sc, которые образуют дисперсные частицы  $L1_2$ -фазы  $\text{Al}_3\text{Zr}$  и  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ . Сплав с такими легирующими элементами способен к высокоскоростной сверхпластичности.

Целью работы являлось изучение нового сплава схожего состава [6], но без меди, а так же: особенностей микроструктуры и показателей сверхпластичности в условиях высоких скоростей деформации.

Сплав Al–4Mg–4Zn–3,6Ni–0,2Zr–0,1Sc получен в лабораторных условиях литьем в медную водоохлаждаемую изложницу. Перед горячей деформацией при температуре  $420 \text{ }^\circ\text{C}$  слиток подвергали двухступенчатому гомогенизационному отжигу. В результате горячей и холодной прокатки получили лист толщиной 1 мм, из которого вырубili стандартные образцы, размером рабочей части  $14 \times 6 \text{ мм}$ .

Изучение показателей сверхпластичности проводили в интервале температур  $400\text{--}520 \text{ }^\circ\text{C}$ . При отжиге, имитирующем нагрев и выдержку при температуре сверхпластической деформации в течение 20 минут, исходная структура сплава всегда оставалась нерекристаллизованной (врезка на рис.). Исследования тонких фольг в просвечивающем электронном микроскопе выявили, что тело зерен свободно от дислокаций, дислокации выстроены в стенки, образуя полигонизованную структуру.

Для определения оптимальной скорости и температуры деформации проводили испытания со ступенчатым повышением скорости после предварительного растяжения на 100% с постоянной скоростью деформации (структура сплава после такой степени деформации рекристаллизуется и состоит из мелких равноосных зерен). По результатам испытаний построены графики зависимости напряжения от скорости деформации и определены показатели скоростной чувствительности  $m$  в интервале температур. Показатель  $m$  в интервале  $0,002 \dots 0,7 \text{ с}^{-1}$  равен 0,5.

Сплав способен к высокоскоростной сверхпластичности. Выбрана оптимальная температура деформации —  $440 \text{ }^\circ\text{C}$  по графику за-

висимости относительного удлинения от напряжения в диапазоне от 420 °С до 520 °С (рис.). В интервале скоростей  $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  при 440 °С были получены высокие относительные удлинения (рис. б), что возможно, благодаря формирующейся в процессе деформации мелкозернистой структуре, за счет бимодального распределения частиц по размерам — крупных выделений  $\text{Al}_3\text{Ni}$ , способствующих прохождению процесса рекристаллизации, и мелких  $\text{Al}_3$  (Sc, Zr), сдерживающих рост зерен при нагреве до температуры сверхпластической деформации.

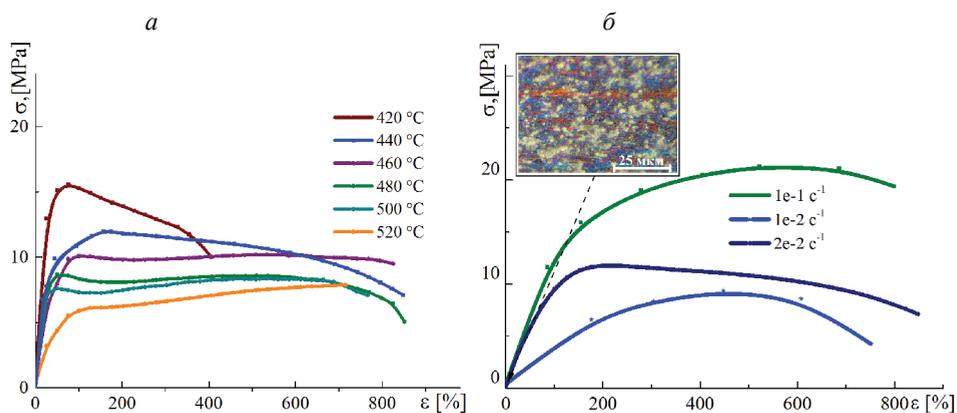


Рис. Кривые растяжения сплава  $\text{Al-4Mg-4Zn-3,6Ni-0,2Zr-0,1Sc}$ :

*a* — при скорости  $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  в интервале температур 420...520 °С,  
*б* — при температуре 440 °С интервале скоростей  $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$

В результате работы определены показатели сверхпластичности сплава, проанализирована эволюция структуры, относительные удлинения, полученные после деформации, позволяют использовать сплав для сверхпластической формовки. Благодаря таким высоким относительным удлинениям в условиях высоких скоростей становится возможным в несколько раз уменьшить время формовки и сделать процесс экономически эффективным для массового производства изделий сложной формы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
 проекта РНФ № 19–79–0035.*

### **Литература**

1. Diffusion creep and superplasticity in aluminium alloys / K. Sotoudeh, P. S. Bate // *Acta Mater.* 2010. V. 58. № 6. P. 1909–1920.
2. Study of fatigue behaviour of 7475 aluminium alloy / B. B. Verma, J. D. Atkinson, K. M. Bull // *Mater. Sci.* 2001. V. 24. P. 231–236.
3. Superplastic Characteristics of Fine-Grained 7475 Aluminum Alloy / M. Abo-Elkhier, S. Soliman // *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2006. V. 80. P. 76–80.
4. The influence of the thermomechanical processing and forming parameters on superplastic behavior of the 7475 aluminium alloy / A. Smolej, M. Gnamus, E. Slacek // *J. Mat. Technol.* 2001. V. 118. P. 397–402.
5. Optimisation of the superplastic forming of aluminium alloys / P. S. Bate [et al.] // *J. Mater. Proces. Techn.* 2006. V. 177. P. 91–94.
6. Effect of the Solid\_Solution Composition on the Superplasticity Characteristics of Al–Zn–Mg–Cu–Ni–Zr Alloys / A. D. Kotov, A. V. Mikhaylovskaya, V. K. Portnoy // *The Physics of Metals and Metallography.* 2014. V. 115. P. 730–735.