

УДК 669.017

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

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
*sitkin96@mail.ru

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

ДЕЙСТВИЕ АККОМОДАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ В ПРОЦЕССЕ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА AA7475

Процесс сверхпластического течения сплава AA7475 основан на сочетании трех основных механизмов: зернограницного скольжения (ЗГС), внутризеренного дислокационного скольжения (ВДС) и диффузионной ползучести (ДП). В ходе проведенной работы было доказано, что наибольший вклад в общую деформацию образца вносит зернограницное скольжение, в то время как ВДС и ДП выступают в роли аккомодационных процессов. Однако деформация за счет внутризеренного дислокационного скольжения незначительна, следовательно, основным аккомодационным механизмом в исследуемом сплаве является диффузионная ползучесть.

Ключевые слова: сверхпластичность, алюминиевые сплавы, механизмы сверхпластической деформации, зернограницное скольжение, диффузионная ползучесть, внутризеренное дислокационное скольжение.

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

ACCOMMODATION MECHANISMS ACTIVITY OF THE SUPERPLASTIC DEFORMATION IN AA7475 ALLOY

The process of superplastic flow of the AA7475 alloy is based on a combination of three main mechanisms: grain boundary sliding (GBS), dislocation slip and diffusion creep. In the course of the work it was proved that the greatest contribution of the overall deformation of the sample is made by grain-boundary sliding, while dislocation slip and diffusion creep were acted as accommodative processes. However, deformation due to dislocation slip is insignificant, therefore, diffusion creep is the main accommodative mechanism in the investigated alloy.

Keywords: superplasticity, aluminum alloys, mechanisms of superplastic deformation, grain boundary sliding, diffusion creep, dislocation slip.

Алюминиевые сплавы способны достигать больших удлинений (до 1000 %) [1, 2] без образования шейки во время сверхпластической деформации (СПД). Благодаря сочетанию высоких механических и

технологических свойств, сплав системы Al–Zn–Mg–Cu (AA7475) находит широкое применение для изготовления изделий сложной конфигурации методом сверхпластической формовки [3, 4].

На данный момент проведено много исследований [5–7], выявляющих механизмы сверхпластической деформации в сплаве AA7475. Ученые пришли к выводу, что основным механизмом СПД – зернограницное скольжение. Однако сильное развитие ЗГС во время деформации образца вызывает появление пор вследствие смещения и смены соседей зернами. Для предотвращения сильной пористости во время деформации подключаются в процесс и аккомодационные механизмы. Действие аккомодационных механизмов обеспечивает приспособление и перестройку зерен в процессе сверхпластического течения. Такими процессами являются внутризеренное дислокационное скольжение и диффузионная ползучесть [8]. Для установления природы сверхпластического течения важно изучать и устанавливать взаимосвязь действующих механизмов.

Целью работы являлось изучение действия аккомодационных механизмов в сплаве AA7475 и их вклад в общую деформацию.

Для исследования был получен сплав, состав которого выбран в пределах марки AA7475: 5,9 % Zn, 2,2 % Mg, 1,7 % Cu, 0,2 % Cr. Полученные стандартные образцы, толщиной 1 мм, шириной рабочей части 6 мм и длиной 14 мм, подвергали высокоскоростному отжигу в селитряной ванне (при 500 °С) с целью измельчения зерна перед сверхпластической деформацией. В результате средний размер зерна уменьшился с $(8,9 \pm 0,4)$ до $(7,2 \pm 0,2)$ мкм. Проводили испытания со скачковым повышением скорости в интервале температур 480–530 °С, определена оптимальная температура испытаний – 500 °С. Скорость деформации 2×10^{-3} с⁻¹ была выбрана как максимальная, позволяющая получить сверхпластичность в сплаве.

Методика определения вкладов ЗГС и ВДС заключалась в измерении смещений маркерных линий или царапин на поверхности образца в процессе сверхпластического течения. Маркеры наносились на полированную поверхность в виде сеток при помощи ионного микроскопа «STRATA FIB 205» или царапин при помощи алмазной пасты. Размер сетки составлял 100x100 мкм с шагом 10 мкм и 2,5 мкм. Шаг 2,5 мкм был выбран с учетом среднего размера зерна после высокоскоростного отжига с целью изучения внутризеренного дислокационного скольжения. Глубина сетки составила 2 мкм. Образцы последовательно деформировали до 0.86 на разрывной машине в атмосфере аргона для предотвращения окисления поверхности во время СПД.

Поверхность образцов на разных стадиях деформации изучали методом электронно-сканирующей микроскопии. Рассчитан вклад ЗГС в сплаве AA7475 по смещениям маркеров, значение достигает 55 % в общую

деформацию, следовательно ЗГС – это основной механизм. По смещениям царапин также был посчитан вклад внутризеренного дислокационного скольжения, он не превысил 5% и незначителен во время последовательного увеличения степени деформации.

На рис. 1 представлена поверхность образцов в процессе деформации, видно, что сверхпластическое течение сопровождается образованием по границам зерен характерного складчатого рельефа. При дальнейшем увеличении степени деформации ширина складчатых областей увеличивается. Складчатые зоны могут быть связаны и с диффузионной составляющей и с дислокационной.

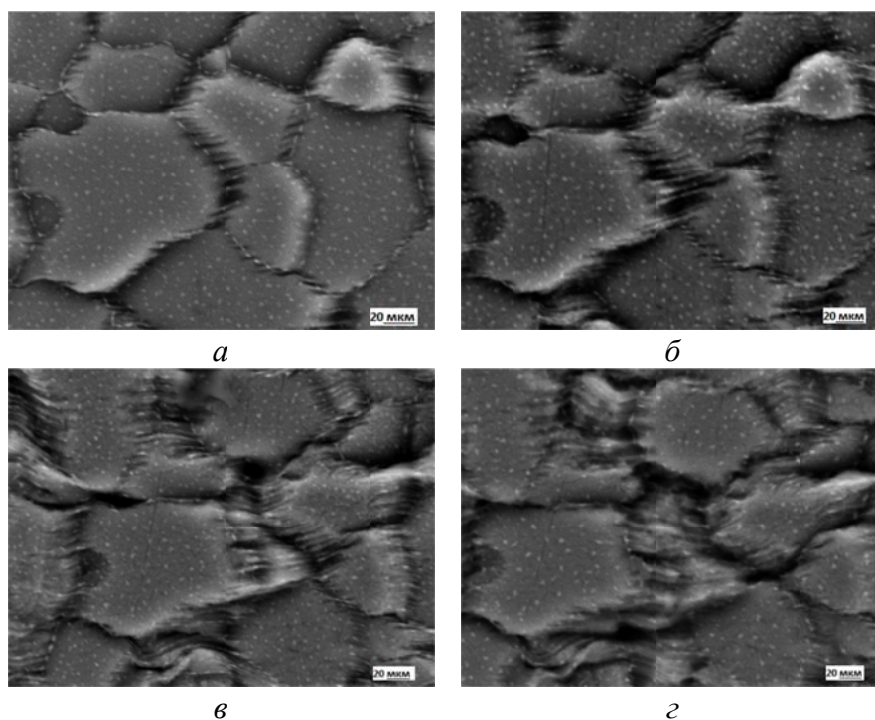


Рис.1. Поверхность образцов после сверхпластической деформации:
а – ($\varepsilon = 0,46$), *б* – ($\varepsilon = 0,63$), *в* – ($\varepsilon = 0,68$), *г* – ($\varepsilon = 0,86$)

Для четкого понимания, какой из аккомодационных механизмов является основным, была рассмотрена структура в просвечивающем электронном микроскопе. Дислокационная структура, представлена на рис. 2. В исследуемом сплаве дисперсные частицы распределены как в теле зерен, так и по их границам до деформации. В процессе сверхпластической деформации происходит образование зон, свободных от выделений, что говорит об активизации диффузионных процессов, а именно действию диффузионной ползучести. Вклад диффузионной ползучести сильно увеличивается с увеличением степени деформации (размер зон свободных от выделений существенно растет), тогда как сильной дислокационной активности не наблюдается.

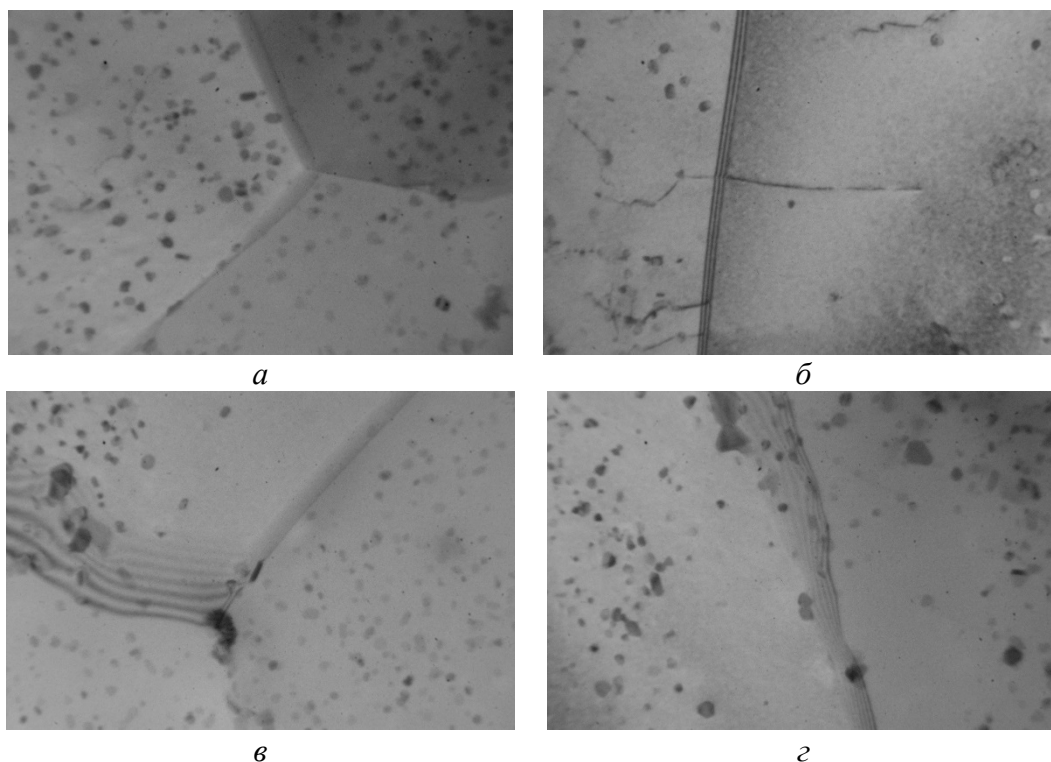


Рис.2. Дислокационная структура сплава AA7475: *a* – перед сверхпластической деформацией, *б* – ($\epsilon=0,17$), *в* – ($\epsilon=0,41$), *з* – ($\epsilon=0,69$)

В заключении можно сделать вывод, что зернограничное скольжение является основным механизмом сверхпластической деформации в сплаве AA7475 и его вклад 55 %. Вклад внутризеренного дислокационного скольжения не превышает 5 % и, следовательно, практически не участвует в процессе деформации. Основным аккомодационный механизм деформации – диффузионная ползучесть, вклад которой сильно растет с увеличением степени деформации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Smolej M. The influence of the thermomechanical processing and forming parameters on superplastic behaviour of the 7475 aluminium alloy / M. Smolej, E. Gnamus // Journal of materials processing technology. 2001. V. 118. P. 397–402.
2. Chen C. L. Effect of grain boundary character distribution (GBCD) on the cavitation behaviour during superplastic deformation of Al 7475 / C. L. Chen, M. J. Tan // Materials Science and Engineering. 2002. V. 338. P. 243–252.

3. Mahmoud A. E. Superplastic Characteristics of fine-grained 7475 / A. E. Mahmoud, S. S. Mahmoud // Journal of Materials Engineering and Performance. 2006. V. 15. P. 76–80.
4. Superplastic deformation behavior of 7075 aluminum alloy / T. Sahraoui [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2003. V. 12. P. 398–401.
5. Lin Z. R. An investigation of grain boundary sliding in superplasticity at high elongations. / Z. R. Lin, A. H. Chokshi, T. G. Langdon // Journal of materials science. 1988. V. 23. P. 2712–2722.
6. Portnoy V. K. Evaluation of grain boundary sliding contribution to the total strain during superplastic deformation. / V. K. Portnoy, I. I. Novikov // Scripta Materialia. 1998. V. 40. P. 39–43.
7. Mukhopadhyay P. Deformation characterization of superplastic AA7475 alloy / P. Mukhopadhyay, S. Biswas, A. H. Chokshi // 2009. V. 62. P. 149–152.
8. О. А. Кайбышев. Сверхпластичность промышленных сплавов. Москва : Металлургия, 1984. 265 с.