

ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ И МЕХАНИЗМЫ ВНУТРИЗЕРЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ВЫСОКОЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Д.В. БОРИСЮК¹, В.Е. ПАНИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: dasha.94.5165@mail.ru

Известно, что зернограничное скольжение (ЗГС) поликристаллических материалов играет важную роль в условиях их ползучести. Однако единого мнения о его природе при низкотемпературной ползучести в литературе не существует. Во многих работах, посвященных исследованию ползучести поликристаллов, развивается концепция, что ЗГС является следствием неоднородности внутризеренного дислокационного скольжения [1-3]. Существует другое мнение, что зернограничное скольжение при низкотемпературной ползучести является ведущим процессом, который аккомодируется механизмами внутризеренной деформации [4-6]. При этом границы зерен выступают над поверхностью образца, что дает возможность исследовать их структуру.

В настоящей работе исследованы процессы на границах зерен поликристаллического высокочистого алюминия в условиях низкотемпературной ползучести, когда сильно выражено зернограничное скольжение. Скорость низкотемпературной ползучести изменяли в широком диапазоне путем изменения внешнего приложенного напряжения, что существенно влияло на развитие ЗГС.

В качестве материала исследования использовали поликристаллический алюминий высокой чистоты (99,999 ат.%). Он характеризуется высокой сдвиговой устойчивостью кристаллической решетки вследствие высоких значений модуля сдвига ($G = 270$ ГПа) и энергии дефекта упаковки ($\gamma = 250$ мДж/м²). Плоские образцы в виде двойной лопатки с размером рабочей части $1,2 \times 8 \times 37$ мм изготавливали из листового проката с последующим отжигом в течение 0,5 ч при 513К. Средний размер зерен поликристаллов составлял $d=400$ мкм. Полированную поверхность образцов для структурных исследований получали электролитической полировкой.

Испытания на ползучесть проводили в специально созданной термостатированной установке при $T=323\text{K} = 0,35T_{\text{пл}}$ в условиях одноосного нагружения. Величину приложенного напряжения изменяли в пределах 11-13 МПа. Удлинение образцов измеряли индикаторами часового типа с точностью ± 1 мкм. Структуру на разных стадиях ползучести изучали методами оптической (Axiovert 25CA), интерференционной (New View 6200), просвечивающей (JEOL 2100) и сканирующей электронной микроскопии (Quanta 200 3D).

Кривые ползучести при $\sigma = 13$ МПа и $\sigma = 18$ МПа имеют стандартный трехстадийный вид. При разрушении после третьей стадии ползучести величина полной пластической деформации составила 32,4% и 40,5% соответственно. При $\sigma = 11$ МПа третья стадия ползучести не достигнута, но механизмы ЗГС на установившейся стадии подробно исследованы.

На поверхности всех образцов хорошо выявляется ЗГС. Под действием низкого напряжения ($\sigma = 11$ МПа) приграничная деформация в зернах, которые испытывают ЗГС, оказывается очень однородной и сильно локализованной. На основной поверхности зерен следы пластической деформации выражены слабо. Результаты, полученные на образцах под напряжением $\sigma = 11$ МПа, свидетельствуют, что при низких напряжениях трансляционно-ротационные моды деформации в основном связаны с границами зерен и приграничными зонами локализованного пластического течения. При увеличении напряжения до $\sigma = 13$ МПа максимальная высота ступенек ЗГС уменьшается и на поверхности зерен в зоне ЗГС развиваются линии аккомодационного скольжения. На протяжении первой половины стадии установившейся ползучести происходит только образование дислокационной ячеи-

стой субструктуры. На завершении данной стадии развивается субмикронная фрагментация зерен и образуются полосы сдвига. Развитие данных механизмов обуславливает переход к третьей стадии ползучести, которая быстро завершается разрушением. Характер пластической деформации поверхностного слоя при ЗГС в условиях ползучести под напряжением $\sigma = 18$ МПа резко меняется. Экструзия материала при ЗГС осуществляется послойным смещением, при этом высота ступенек не превышает 3 мкм. Деформация охватывает весь объем зерна. Следует отметить сильную деградацию материала в зоне ЗГС. Происходит слоистая фрагментация приграничной зоны. Это свидетельствует о сильной неравновесности материала в зоне ЗГС на третьей стадии ползучести. Как следствие, пластическая деформация в приграничной зоне развивается некристаллографически, что резко увеличивает скорость ползучести на ее третьей стадии.

Зернограничное скольжение при низкотемпературной ползучести поликристаллов высококчистого алюминия А999 на всех стадиях ползучести является первичным процессом, который аккомодируется ротационными модами внутриверного пластического течения. При малых скоростях ползучести под действием низких приложенных напряжений $\sigma = 11$ МПа аккомодационная приграничная деформация осуществляется дислокационными механизмами микромасштабного уровня. Увеличение приложенного напряжения до 13 МПа увеличивает скорость ползучести. На поверхности деформируемых образцов развиваются линии одиночного скольжения, которые обуславливают послойную пластическую деформацию экструдированного при ЗГС материала, развивается фрагментация приграничных зон. Вклад дислокаций в пластическое течение резко уменьшается. Послойная пластическая деформация, фрагментация экструдированного материала при ЗГС резко возрастают при высоком приложенном напряжении $\sigma = 18$ МПа. В приграничных зонах развиваются некристаллографическое скольжение и фрагментация материала, деградирует структура материала в зоне ЗГС. Самосогласование данных механизмов вызывает резкое увеличение скорости ползучести на третьей стадии и приводит к разрушению образцов.

Список литературы

1. Matsunaga T., Kameyama T., Sato E. Grain boundary sliding induced by lattice dislocation activity during ambient temperature creep in h.c.p. metals // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2009. V. 3. Article 012014.
2. Matsunaga T., Kameyama T., Ueda S., Sato E. Grain boundary sliding during ambient-temperature creep in hexagonal close-packed metals // Phil. Mag. 2010. V. 90. N 30. P. 4041–4054.
3. Wang Z., Zhao Y., Kohlstedt D.L. Dislocation creep accommodated by grain boundary sliding in dunite // J. Earth Sci. 2010. Iss. 5. P. 541–554.
4. Gifkins R.C. Grain-boundary sliding and its accommodation during creep and superplasticity // Met. Trans. 1976. V. 7A. Iss. 8. P. 1225–1232.
5. Panin V.E., Egorushkin V.E. and Elsukova T.F. Physical Mesomechanics of Grain Boundary Sliding in a Deformable Polycrystal // Phys. Mesomech. – 2013. – V. 16. – No 1. – P. 1–8.
6. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Сурикова Н.С., Попкова Ю.Ф., Борисюк Д.В. Роль поворотных мод деформации в процессах разрушения поликристаллов высококчистого алюминия при низкотемпературной ползучести // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 12. – С. 2–9.