

МИГРАЦИЯ ГРАНИЦ ЗЕРЕН И ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.В. Брюховецкий, В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, В.Ф. Клепиков
Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, г. Харьков;
*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
г. Харьков, Украина*

Изучена взаимосвязь процессов зернограничного проскальзывания и миграции границ зерен в условиях сверхпластической деформации сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr. Обсуждается возможная модель активизации границ зерен в ходе высокотемпературной сверхпластической деформации, проявляющаяся в процессах их миграции и предполагающая появление локальных «подплавов» на границах зерен.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в условиях радиационной ползучести могут действовать механизмы деформации, свойственные сверхпластичности, в том числе и главный из них – позеренный массоперенос, осуществляющийся путем зернограничного проскальзывания. Механизмы осуществления зернограничного проскальзывания в условиях сверхпластичности изучены еще не достаточно. Поэтому исследования в этом направлении могут быть полезными не только для проблемы сверхпластичности, но и для изучения явлений радиационной ползучести и сверхпластичности облученных материалов.

Учитывая тот факт, что главным деформационным механизмом сверхпластического течения является зернограничное проскальзывание, было выдвинуто предположение [1,2], что границы зерен в условиях сверхпластичности переходят в особое неравновесное состояние, что обеспечивает возможность их интенсивного проскальзывания. Неравновесность границ поддерживается их взаимодействием во время деформации с решеточными дислокациями. В работах [3,4] границы характеризовались как жидкоподобные, причиной чему являлась интенсивная перестройка атомной структуры границы, вызванная делокализацией ядер решеточных дислокаций.

В ряде более поздних работ (см., например, [5-10]) наблюдалось наличие жидкой фазы на границах зерен в условиях реализации сверхпластичности алюминиевых сплавов при высоких гомологических температурах. При этом авторы этих работ отводят жидкой фазе на границах решающую роль в осуществлении интенсивного зернограничного проскальзывания в условиях сверхпластической деформации. Жидкая фаза играет роль и активизатора границ зерен, а также и аккомодационного помощника при осуществлении зернограничного проскальзывания.

Все вышеперечисленные способы активизации границ зерен в условиях сверхпластичности имеют ряд допущений. Они развиты либо только для мелкозернистых материалов, либо требуют высоких гомологических температур, близких или превышаю-

щих температуру солидус. В данной работе, основываясь на тех же представлениях о сверхпластичности как пластическом течении поликристаллического материала, в котором границы зерен находятся в особом структурном состоянии, рассмотрен еще один процесс, а именно, миграция границ зерен как активизатор зернограничного проскальзывания в условиях сверхпластичности при высоких гомологических температурах, но когда образование жидкой фазы в соответствии с фазовой диаграммой сплава еще не возможно.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены на образцах с размерами рабочей части $4,5 \times 1,5 \times 10,0$ мм сплава типа «супрал» (Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr). Механические испытания растяжением проводились на воздухе в режиме ползучести при постоянном действующем напряжении течения. Развитие структуры в ходе сверхпластической деформации исследовали на свежеприготовленных внутренних срезах деформируемых образцов при помощи световой микроскопии, применяя стандартные методы количественной металлографии. Электронно-микроскопические исследования проведены на микроскопе Tesla BS-540.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Сплав Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr ранее проявил сверхпластичность в условиях деформирования образцов при постоянном действующем напряжении течения [11]. Максимальное удлинение образцов до разрушения δ при деформировании их в оптимальных условиях сверхпластичности (напряжение течения $\sigma = 5,0$ МПа, истинная скорость деформации $\dot{\epsilon} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, температура $T = 773$ К) составляет ~90%. Вклад зернограничного проскальзывания в общую деформацию достаточно высок и составляет ~50%. Зеренная структура исходных образцов является достаточно однородной и

мелкозернистой, со средним размером зерна 10... 15 мкм [11,12].

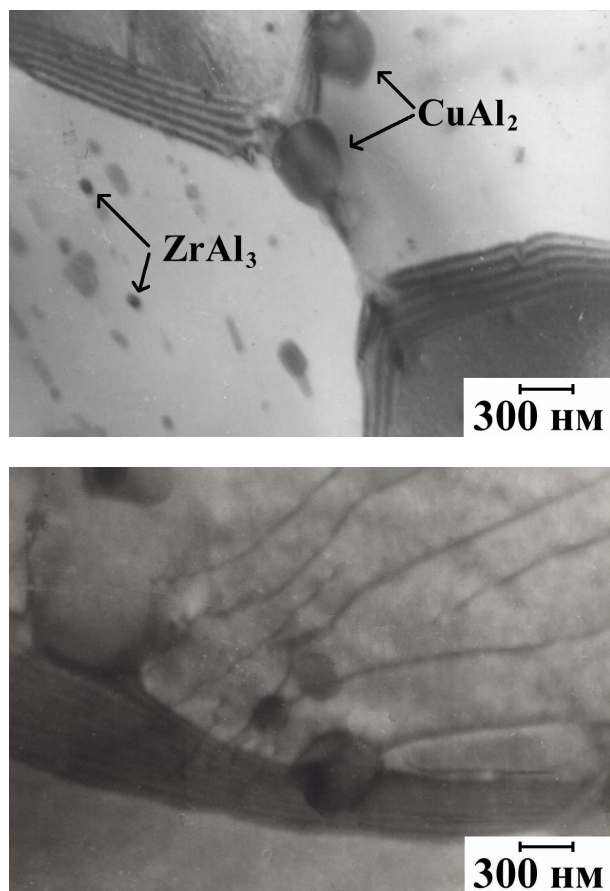


Рис. 1. Тонкая структура образцов сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr, деформированных в оптимальных условиях сверхпластичности

Электронно-микроскопические исследования показали, что исходные образцы сплава, а также деформированные в оптимальных условиях сверхпластичности имеют матричную структуру. Выделения фазы CuAl_2 локализованы преимущественно на границах зерен, а дисперсные частицы фазы ZrAl_3 локализованы как на границах, так и в теле зерен (рис. 1).

Наличие в сплаве частиц фаз ZrAl_3 , а также и CuAl_2 обеспечивает относительную термическую стабильность зеренной структуры даже при достаточно высоких гомологических температурах [13]. Видимо, поэтому зеренная структура деформированных образцов изучаемого сплава и к моменту их разрушения сохраняет свою равноосность и относительную стабильность.

Установлено, что миграция границ зерен, не приводящая к росту среднего размера зерна, наблюдается на протяжении всей деформации образцов сплава вплоть до их разрушения. На мигрирующих границах видно осуществление зернограничного проскальзывания (рис. 2). Расстояние, на которое мигрируют границы, как правило, не превышает 1/10 размера зерна. Зачастую же шаг локальной миграции границ зерен не превышает даже 1 мкм, т. е. со-

поставим с размерами частиц фазы CuAl_2 . Таким образом, учитывая то, что в исходном состоянии на границах зерен локализованы частицы фаз, препятствующих осуществлению зернограничного проскальзывания, миграция позволяет границе выбирать путь для осуществления более легкого проскальзывания в обход этих частиц.

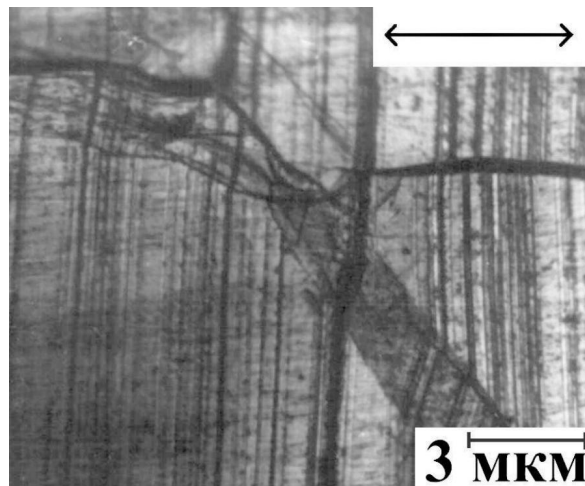


Рис. 2. Вид деформационного рельефа образца сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr, деформированного в оптимальных условиях сверхпластичности. Направление растяжения указано стрелкой

Как видно из рис. 3, в ходе сверхпластической деформации образцов исследуемого сплава осуществлялось взаимодействие решеточных дислокаций и границ зерен, о чем свидетельствует наличие дефектов в виде прямых и искривленных линий вблизи и на границе зерна. В [1,2] утверждается, что именно такие дефекты соответствуют следам перемещения плоскостей скольжения с поверхностью границы, а присутствие на них искривленных линий свидетельствует о переползании дислокаций в ходе осуществления сверхпластической деформации.

Тесная взаимосвязь зернограничного проскальзывания и миграции границ зерен в условиях сверхпластической деформации отмечалась уже и ранее [14]. Однако локальная миграция границ зерен рассматривалась только с точки зрения аккомодации межзеренного проскальзывания. Принимая же во внимание высокую миграционную способность границ зерен в условиях сверхпластического течения, можно предположить наличие в этих условиях следующего механизма активизации границ зерен. Так, в любой момент деформации наличие включений фаз в образце создает локальные области перенапряжений, что ведет к искажению микроструктуры и, следовательно, к ослаблению межатомных связей. Снимать же искажения может миграция границ зерен.

При высоких температурах сверхпластической деформации в условиях создавшихся перенапряжений и ослабленных межатомных связей процесс миграции может осуществляться аналогично модели групповых переходов Мотта [15], предложенной для

объяснения миграции границ чистых металлов. В каждый момент времени на мигрирующей границе некоторые локальные участки из искажённой области будут плавиться, а затем кристаллизуются уже в неискаженном состоянии, принимая структуру растущего зерна. Мигрирующая граница при этом будет состоять из областей хорошего сопряжения и расплавленных участков. В таком состоянии граница будет пригодна для осуществления лёгкого проскальзывания. Таким образом, в условиях приложенного внешнего напряжения снятие искажений структуры путём миграции границ будет сопровождаться одновременным проскальзыванием зерен по этим границам; т. е. под действием приложенных напряжений и при наличии мигающих подплавов на границах будут созданы условия, способствующие микроаккомодации и возможности интенсивного проскальзывания и разворота зерен, а именно такие условия и нужны для реализации в материале эффекта сверхпластичности.

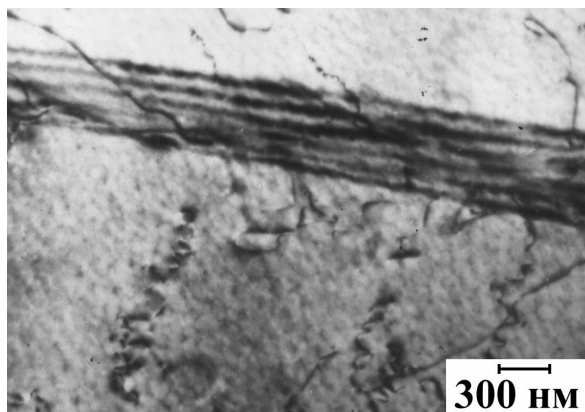


Рис. 3. Тонкая структура образца сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr, деформированного до разрушения в оптимальных условиях сверхпластичности

Приняв такую точку зрения, можно считать, что частицы фазы CuAl_2 , так же как и фазы ZrAl_3 , важны не только для сохранения мелкозернистой структуры при деформировании образцов сплава в области повышенных температур, но также и для перевода границ зерен в высокоактивизированное состояние, необходимое для осуществления зернограничного проскальзывания. Следует отметить также важную роль в реализации эффекта сверхпластичности в сплаве Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr такого легирующего элемента как медь, так как известно [16], что бинарный сплав Al-0,5%Zr, обладающий мелкозернистой структурой, сверхпластичным не является. Благодаря наличию меди в сплаве, во-первых, вокруг частиц фазы CuAl_2 наиболее легко осуществляется динамическая рекристаллизация, а во-вторых, масштабное перемещение границ зерен подавляется твердым раствором меди в алюминии [17]. При этом сверхпластичные свойства выражены лучше всего в том случае, когда частицы фазы CuAl_2 распределены наиболее равномерно. Именно содер-

жание меди, близкое к 4...5%, является наиболее оптимальным для проявления сверхпластичных свойств сплавами системы Al-Cu-Zr.

ВЫВОДЫ

1. Миграция границ зерен, не приводящая к росту среднего размера зерна, наблюдается на протяжении всей деформации образцов сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr вплоть до их разрушения. Расстояние, на которое мигрируют границы, как правило, не превышает 1/10 размера зерна.
2. Частицы фазы CuAl_2 , так же как и фазы ZrAl_3 , важны не только для сохранения мелкозернистой структуры при деформировании образцов сплава в области повышенных температур, но так же и как средство для перевода границ зерен в высокоактивизированное состояние, необходимое для осуществления зернограничного проскальзывания.

Работа выполнена в рамках Программы проведения фундаментальных исследований по атомной науке и технике ННЦ ХФТИ.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственной программы фундаментальных и прикладных исследований по проблемам использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики. Договор №Х-873.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.З. Валиев, О.А. Кайбышев. Дислокации в границах зерен и зернограничное проскальзывание при сверхпластической деформации // *ДАН СССР*. 1977, т. 236, №2, с. 339–342.
2. О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев, Н.К. Ценев. Влияние состояния границ зерен на сверхпластическое течение // *ДАН СССР*. 1984, т. 278, №1, с. 93–97.
3. В.В. Рыбин, В.Н. Перевезенцев. О природе структурной сверхпластичности // *Письма в ЖТФ*. 1981, т. 7, в. 19, с. 1203–1205.
4. В.Н. Перевезенцев. Современные представления о природе структурной сверхпластичности // *Вопросы теории дефектов в кристаллах* / Под. ред. С.В. Вонсовского, М.А. Кривоглаза. Л.: «Наука», 1987, с. 85–100.
5. B. Baudelet, M.C. Dang, F. Bordeaux. Mechanical behavior of an aluminum alloy with fusible grain boundaries // *Scr. met. et mater.* 1992, v. 26, N4, p. 573–578.
6. K. Higashi, T.G. Nieh, M. Mabuchi, J. Wadsworth. Effect of liquid-phases on the tensile elongation of superplastic aluminum-alloys and composites // *Scripta Met. et Mater.* 1995, v. 32, N7, p. 1079–1084.
7. T.G. Nieh, J. Wadsworth. The role of liquid phase on superplasticity in metals and ceramics // *Mater. Sci. Forum*. 1997, v. 233–234, p. 383–398.
8. J. Koike, M. Mabuchi, K. Higashi. In-situ observation of partial melting in superplastic aluminum-alloy com-

- posites at high-temperatures // *Acta Metal. et Mater.* 1995, v. 43, N1, p. 199–206.
9. Y. Takayama, T. Tozawa, H. Kato. Superplasticity and thickness of liquid phase in the vicinity of solidus temperature in a 7475 aluminum alloy // *Acta Mater.* 1999, v. 47, N4, p. 1263–1270.
10. В.В. Брюховецкий О причинах высокотемпературной сверхпластичности крупнозернистого алюминиевого сплава типа "авиаль" // *ФММ.* 2001, т.92, №1, с. 107–111.
11. В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Н.К. Ценев, Т.Ф. Сухова, А.И. Письменная. Эволюция пористости и разрушение сплава Al–4,1 мас.% Cu–0,5 мас.% Zr в условиях сверхпластического течения // *Металлофизика.* 1990, т. 12, №1, с. 44–48.
12. В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, В.В. Брюховецкий, Н.К. Ценев, Т.Ф. Сухова. Влияние морфологии зернограницной несплошности на локализацию сверхпластической деформации сплава Al–Cu–Zr // *Металлофизика и новейшие технологии.* 2001, т. 23, №8, с. 1003–1011.
13. В.И. Елагин. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: «Металлургия», 1975, 247 с.
14. В.Н. Перевезенцев, В.В. Рыбин, В.Н. Чувильдеев. Локальная миграция границ и аккомодация межзеренного проскальзывания в условиях структурной сверхпластичности // *Поверхность.* 1985, № 11, с.101–108.
15. N.F. Mott Slip at Grain Boundaries and Grain Growth in Metals // *Proc. Phys. Soc.* 1948, v. 60, p. 391–394.
16. *Рекристаллизация металлических материалов.* /Под. ред. Ф. Хесснера. Пер. с англ. М.: «Металлургия», 1982, с. 249–252.
17. N. Furushiro, Y. Umakoshi, K. Warashina. Role of Alloying Element in Superplastic Deformation of Aluminum Alloys // *Mater. Sci. Forum.* 2001, v. 357–359, p. 249–254.

МІГРАЦІЯ МЕЖ ЗЕРЕН ТА ЗЕРНОМЕЖЕВЕ ПРОКОВЗУВАННЯ В УМОВАХ НАДПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

В.В. Брюховецький, В.П. Пойда, Р.І. Кузнецова, В.Ф. Клепиков

Вивчено взаємозв'язок процесів зерномежевого проковзування та міграції меж зерен в умовах надпластичної деформації сплаву Al-4,1мас. %Cu-0,5мас. %Zr. Обговорюється можлива модель активізації меж зерен під час здійснення високотемпературної надпластичної деформації, яка проявляється у процесах їх міграції та завбачає виникнення локальних підплавів на межах зерен.

GRAIN BOUNDARY MIGRATION AND GRAIN BOUNDARY SLIDING UNDER THE CONDITION OF SUPERPLASTIC DEFORMATION

V.V. Bryukhovetsky, V.P. Poida, R.I. Kuznetsova, V.F. Klepikov

The interplay between the processes of grain boundary sliding and grain boundary migration under the condition of superplastic deformation of Al-4,1%wt.Cu-0,5%wt.Zr alloy is studied. The possible model is discussed for the grain boundary activation under the conditions of high-temperature superplastic deformation which manifests in the process of their migration and assumes the beginning of local melting on the grain boundary.