

Структурные изменения при сверхпластической деформации сплавов системы Al-Mg-Mn-Cr

[†]Яковцева О.А., Михайловская А.В., Портной В.К.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

[†]yakovtsevao@mail.ru

Structural changes during superplastic deformation of alloys of Al-Mg-Mn-Cr system

O.A. Yakovtseva, A.V. Mikhaylovskaya, V.K. Portnoy

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow

Исследованы микроструктура и показатели сверхпластичности сплавов Al-4,9 % Mg-0,6 % Mn и Al-4,9 % Mg-0,6 % Mn-0,25 % Cr. Проведен анализ изменений зеренной структуры и рельефа поверхности образцов в процессе сверхпластической деформации сплавов. Определен вклад зернограницного скольжения в общую деформацию.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, зеренная структура, сверхпластичность, зернограницное скольжение.

Microstructure and superplasticity characteristics of Al-4.9 % Mg-0.6 % Mn and Al-4.9 % Mg-0.6 % Mn-0.25 % Cr alloys were studied. Grain structure and surface-relief changes during superplastic deformation were analyzed. The contribution of the grain boundary sliding to the total strain was determined.

Key words: aluminium alloys, granular structure, superplasticity, grain boundary sliding

1. Введение

Одним из самых широко используемых магналиев (сплавов системы Al-Mg) является сплав AA5083, имеющий удовлетворительные механические свойства, высокую коррозионную стойкость и хорошую технологичность при обработке давлением. Именно этот сплав используется для сверхпластической формовки [1]. Для обеспечения сверхпластичности листы сплава должны иметь равноосные зерна с размером менее 10 мкм [2].

В сплавах типа «магналий» частицы фаз Al_6Mn и $Al_6(Mn,Cr)$ позволяют получить мелкое зерно и сверхпластичность, причем совместное введение марганца и хрома обеспечивает более мелкозернистую стабильную при сверхпластической деформации (СПД) структуру [3-4]. Однако, по данным [5-6] присутствие таких частиц может сдерживать зернограницное скольжение (ЗГС), которое является основным механизмом деформации для большинства сверхпластичных сплавов. При малом вкладе ЗГС [5-8] возможен более весомый вклад других механизмов деформации – внутризеренной дислокационной и диффузионной ползучести [9, 10]. В результате действия последних механизмов неизбежно значительное вытягивание зерен вдоль оси деформации, и для продолжения деформации необходимо их деление [5-8]. Мнения исследователей о доминирующем механизме сверхпластической деформации разных сплавов расходятся. Цель данной работы – исследование дина-

мики изменения зеренной структуры в процессе СПД и определение вклада зернограницного скольжения в общее удлинение при сверхпластической деформации сплавов, содержащих дисперсные частицы фаз Al_6Mn или $Al_6(Mn,Cr)$.

2. Методика проведения экспериментов

Анализировали два сплава: Al-4,9%Mg-0,6%Mn и Al-4,9%Mg-0,6%Mn-0,25%Cr, обозначенные М и С соответственно. Слитки отливали в медную водоохлаждаемую изложницу размерами 100×40×20 мм. Для приготовления сплавов использовали следующие шихтовые материалы: алюминий марки А99, магний марки Мг95. Для введения в сплавы переходных металлов использовали лигатуры: Al-10 %Mn и Al-10 %Cr. Температура расплава при литье составляла 780 °С. Для гомогенизации слитки отжигали при 460 °С в течение 8 ч. Горячую ($\epsilon = 80\%$, $t = 420$ °С), а затем холодную ($\epsilon = 70\%$) прокатку проводили на лабораторном двухвалковом стане ДУО250 до конечной толщины листа 1 мм. Рекристаллизационный отжиг, имитирующий нагрев до температуры сверхпластической деформации, проводили при 550 °С в течение 20 мин. Для термической обработки использовали муфельную электрическую печь сопротивления с точностью поддержания температуры ± 5 °С.

Микроструктуру сплавов изучали в световом микроскопе Axiovert 200MMat. Микрошлифы готовили мето-

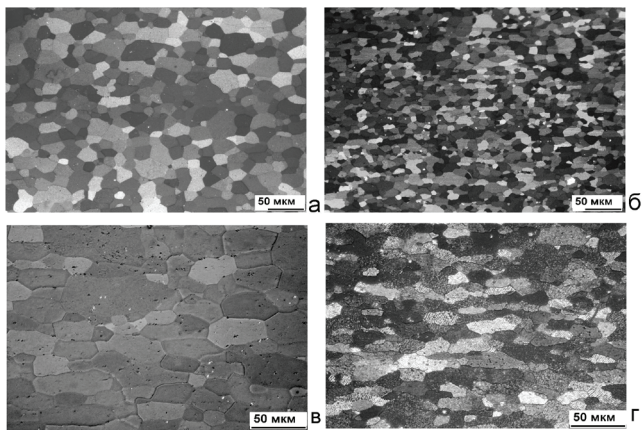


Рис. 1. Структура сплавов без хрома (а,в) и с хромом (б,г) после 20 минут отжига холоднокатаных листов при температуре 550 °С (а,б) и после 100% сверхпластической деформации (в-г) при той же температуре (направление прокатки и ось растяжения горизонтальны).

дами механического шлифования и полирования, затем применяли электролитическое полирование в течение 7-8 секунд при напряжении 15 - 20 В в хлорно-спиртовом электролите. Для выявления зеренной структуры образцов проводили анодное оксидирование в 10%-ном водном растворе фторбороводородной кислоты. Шли-

фы анализировали в плоскостях (s-L) и (t-L), где L – направление прокатки, t – ширина, s – толщина образца. Средний размер зерен определяли методом случайных секущих, анализируя не менее 300 пересечений. Доверительный интервал определяли с вероятностью 95%.

Для определения оптимальной скорости деформации проводили скачковые испытания с повышением скорости деформации на испытательной машине 1231-У10 с компьютерным управлением. Образцы имели размеры рабочей части 14×6×1 мм.

Вклад зернограницного скольжения определяли методом маркерных царапин. На полированные образцы наносили маркерные царапины поперек оси последующего растяжения. Параллельные царапины наносили с помощью алмазной пасты дисперсностью 3 мкм. Затем проводили серию испытаний и изучали структуру образцов после истинной деформации 0,14; 0,36 и 0,8. Структуру поверхности растянутых образцов на каждой ступени изучали при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в JEOL JSM 35-CX.

3. Результаты исследования и их анализ

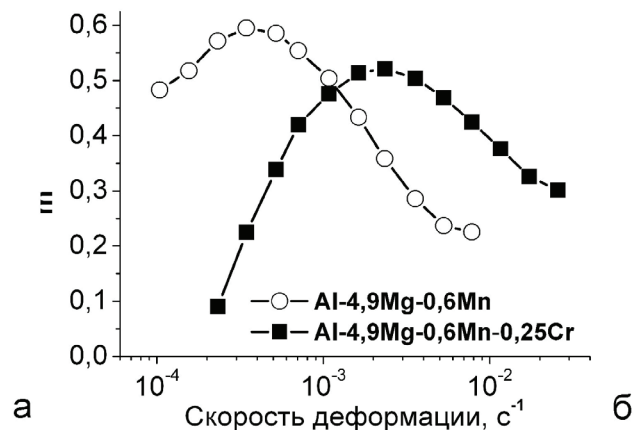
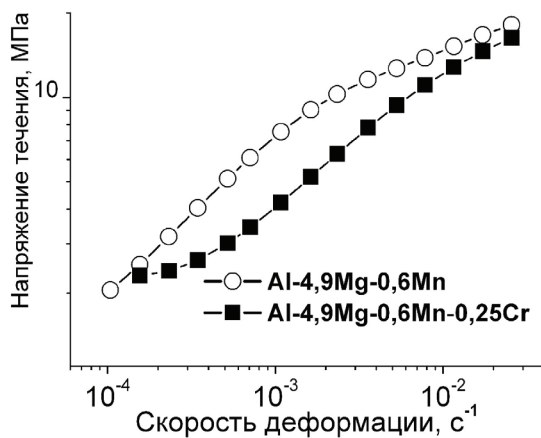


Рис. 2. Зависимости напряжения течения от скорости (а) и показателя скоростной чувствительности (б) от скорости деформации для сплавов М и С.

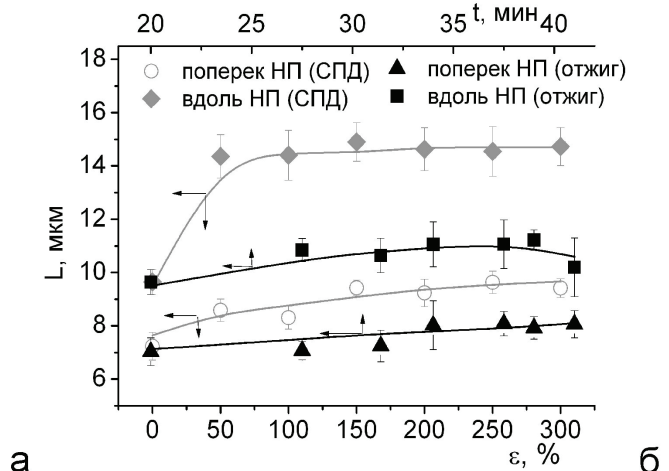
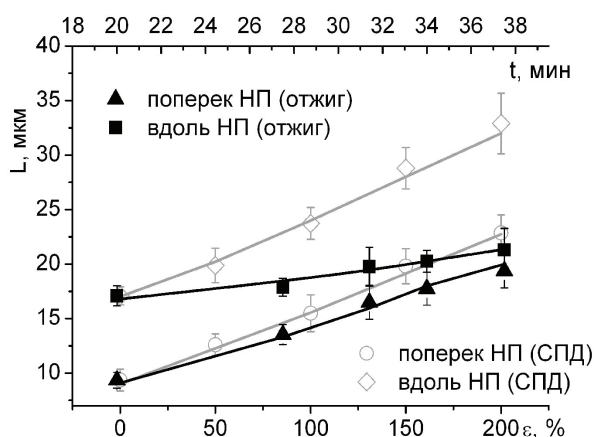


Рис. 3. Изменение размера зерна сплавов М и С в направлениях L (а) и s плоскости (L-s) (б) при сверхпластической деформации и отжиге.

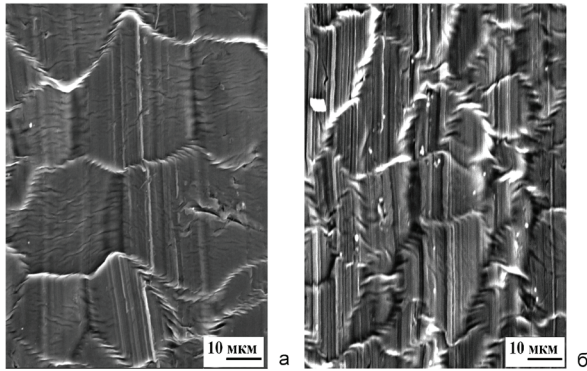


Рис. 4. Смещения царапин в сплавах М (а) и С (б) после деформации 0,14 (СЭМ, структура поверхности).

Добавка 0,25%Сг обеспечивает более мелкое зерно после 20 мин отжига при 550 °С (рис. 1 а, б). Средний размер исходного зерна в сплаве без хрома равен $17,1 \pm 0,4$ мкм в продольном направлении и $13,7 \pm 3,4$ мкм в поперечном, а в сплаве с хромом – $9,6 \pm 0,5$ мкм в продольном направлении и $6,4 \pm 1,5$ мкм в поперечном.

На рис. 2 а приведена экспериментальная зависимость напряжения течения от скорости деформации для обоих сплавов, по данным которой строили полулогарифмическую скоростную зависимость показателя скоростной чувствительности m (рис. 2 б). Напряжение течения для сплавов М и С не превышает 10 МПа. Оптимальная скорость деформации равна $8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ для сплава, содержащего только марганец, и $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ – для сплава с марганцем и хромом. Для исследования структурных

изменений во время СПД и механизмов СПД была выбрана скорость $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, так как для обоих сплавов эта скорость лежит в интервале скоростей сверхпластичности (при $m=0.5$).

После 100% СПД среднее значение размера зерна в сплаве без хрома увеличивается до 22 мкм, а в сплаве с хромом – до 15 мкм.

Была исследована структура образцов после различных степеней деформации в плоскостях L_s и L_t . На рис. 3 показано изменение размера зерна в процессе отжига и деформации с 50 до 200 % (300 % в сплаве С). Происходит закономерный рост зерен во всех плоскостях, содержащих направление, L для обоих сплавов в области рабочей части, причем вдоль оси растяжения зерна вытягиваются в 1,5 раза. Рост зерна в сплаве М идет интенсивнее, чем в сплаве С, где зерно растет только в первые 50 % деформации, а затем слабо меняет размер. Скорость роста зерна в сплаве М при отжиге в 3 раза меньше, чем при СПД: при отжиге примерно 0,5 мкм/мин, а при СПД – 1,2 мкм/мин. Столь значительных различий в сплаве С не наблюдается, зерно в сплаве С стабильное при отжиге и СПД, средняя скорость роста в разных направлениях составляет 0,2 мкм/мин.

Коэффициент формы зерен, оцененный как отношение продольного размера зерен в направлении L к поперечному в направлении s , во время СПД в сплаве М увеличивается с 1,3 до 1,8, а в сплаве С – с 1,5 до 1,7.

Динамика структурных изменений в образцах рассмотрена после деформации образцов до 0,14; 0,36 и 0,8.

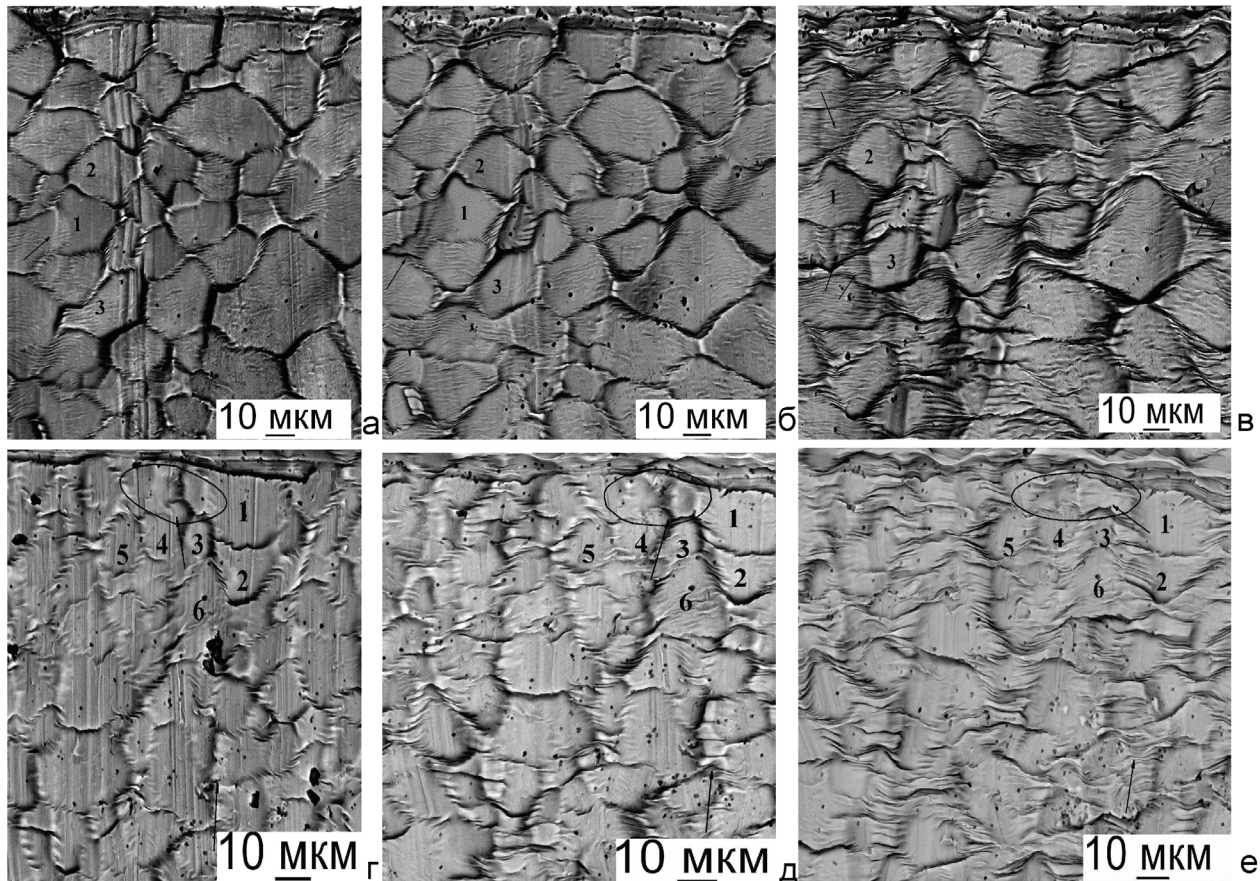


Рис. 5. Изменение рельефа поверхности сплава М (а, б, в) и С (г, д, е) во время сверхпластической деформации со скоростью 10^{-3} с^{-1} при $T = 550 \text{ °C}$ после истинной деформации равной 0,14 (а, г), 0,36 (б, д) и 0,8 (в, е).

После деформации на поверхности образцов возникает характерный рельеф вблизи границ зерен. Деформация идет однородно во всей рабочей части образцов уже с деформации 0,14. Размер зерна, измеренный на поверхности образцов (в продольном направлении 17 ± 1 мкм в сплаве М и 11 ± 1 мкм в сплаве С), в пределах доверительного интервала совпадает с размером зерна, полученным после той же степени деформации в объеме образцов.

Оценивали вклад ЗГС в общую деформацию по смещениям поперечных маркерных царапин, нанесенных на поверхность предварительно полированных образцов (рис. 4). Смещения царапин у сплава без хрома (рис. 4 а) и развороты зерен заметны уже при деформации 0,14, в сплаве с хромом при малых степенях деформации царапины только изгибаются (рис. 4 б).

В результате сверхпластической деформации на поверхности образцов появляется складчатый рельеф - складки оксида, ориентированные вдоль оси деформации [10] (рис. 4-5). В сплаве без хрома «складки» наблюдаются и по границам зерен, и в теле зерен, что приводит к некоторому размытию маркерных царапин. В деформированных образцах наблюдали вытягивание зерен, смещение царапин по границам зерен и развороты зерен (рис. 5 а).

В сплаве с хромом деформация локализуется вдоль границ (рис. 5б) (в «мантии» зерна по Джибкинсу [цит. по 3]), где формируется большое число складок, т.е. деформация всего зерна незаметна. При этом, маркерные царапины сохраняются вплоть до деформации 0,8, исчезая только в сильно деформированных участках вблизи границ зерен, поверхность тела зерна оставалась гладкой. После накопленной деформации 0,8 наблюдали локализованные широкие складчатые области (стрелки рис. 5 в) и появление новых поперечных границ зерен (см. пунктир на рис. 5 в).

Вклад ЗГС в деформацию в сплаве М составил 26%, а в сплаве С – 14% после истинной деформации 0,14. В процессе деформации вклад ЗГС в общую деформацию уменьшается. После деформации 0,8 она составила в сплаве М – 5%, а в сплаве С – 2,5%. Заметим, что вклад зернограницного скольжения в общую деформацию незначителен, по сравнению с другими сверхпластичными сплавами, например, Zn-22%Al [2,5,6], где он достигал 60-80%. В сплаве с хромом зерно вытягивается за первые 50% сверхпластической деформации и далее до 300% деформации практически не меняет своего размера в продольном направлении, несколько подрастает в поперечном (рис. 3). Учитывая, что вклад ЗГС не велик, можно предположить, что зерно делится во время деформации, благодаря чему средний размер сохраняется.

4. Заключение

Исследованы структурные изменения в процессе сверхпластической деформации сплавов Al-4,9%Mg-0,6%Mn и Al-4,9%Mg-0,6%Mn-0,25%Cr. В присутствии хрома

в сплаве формируется более мелкое и стабильное при сверхпластической деформации зерно. Показано, что в процессе сверхпластической деформации на поверхности образцов образуются ориентированные вдоль оси деформации складчатые зоны - в сплаве с хромом в «мантии» зерна, а в сплаве без хрома на всей поверхности зерен. При увеличении истинной деформации с 0,14 до 0,8 вклад зернограницного скольжения, оцененный по смещению маркерных царапин, уменьшается с 26 до 5% в сплаве с марганцем, и с 14 до 2,5% в сплаве с хромом и марганцем.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (соглашение №12-03-31164/12) и Гранта Президента РФ (договор №14.125.13.232-МК).

Литература

1. Dunwoody B.J. The Production of Automotive Body Panels in 5083 SPF Aluminium Alloy. Trans. Tech. Publications, Switzerland. Material Science Forum, 2001, V. 357-359, P. 59 – 64.
2. Новиков И. И., Портной В. К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. М.: Металлургия, 1981, 168 с.
3. Портной В.К., Рылов Д.С., Левченко В.С., Алалыкин А.А.. Сверхпластичный магналий для повышенных скоростей сверхпластической формовки. Цветные Металлы, 2005, №1, С. 84-87.
4. Kannan K., Hamilton C. H. Inhomogeneities in initial cavity distribution in a superplastic Al 5083 alloy. Scr. Materialia. 1998, V. 38, №2, P. 299-305.
5. Новиков И.И., Портной В.К. Особенности сверхпластической деформации некоторых алюминиевых сплавов. Изв. вузов. Цветная металлургия, 2001, № 4, С. 4-11.
6. Portnoy V.K., Novikov I.I. Evaluation of grain boundary sliding contribution to the total strain during superplastic deformation. Scr. Materialia, 1999, V. 40, №1, P. 39-43.
7. Позднякова А.В., Портной В.К. Особенности структурных изменений при сверхпластической деформации сплава АМг4. Изв. вузов. Цветная металлургия, 2004, №1, С. 53-56.
8. Никифоров А.О., Польшин В.И., Новиков И.И., Сверхпластичность сплава АМг4. Цветные металлы, 1995, № 3, С. 54-56.
9. Rust M.A., Todd R.I. Surface studies of Region II superplasticity of AA5083 in shear: Confirmation of diffusion creep, grain neighbor switching and absence of dislocation activity. Acta Materialia, 2011, V. 59, P. 5159-5170.
10. Sotoudeh K., Bate P.S. Diffusion creep and superplasticity in aluminium alloys. Acta Materialia, 2010, V. 58, P. 1909-1920.