

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВА AL-MG-MN, ПОДВЕРГНУТОГО ИПД

Никулин И. А., Кипелова А. Ю.

ФГАОУ ВПО "Белгородский государственный национальный исследовательский университет", Белгород, Россия (308015, Белгород, ул. Победы, 85), e-mail: nikulin_ilya@bsu.edu.ru

В работе рассматривается возможность перевода промышленного алюминиевого сплава 1561 в сверхпластическое состояние при помощи методов интенсивной пластической деформации (ИПД) путем формирования субмикроструктурной структуры. Показано, что субмикроструктурная структура со средним размером зерен 1 мкм может быть сформирована в листах алюминиевого сплава 1561 методом интенсивной пластической деформации, включающем равноканальное угловое (РКУ) прессование и изотермическую прокатку. В результате стабилизации границ зерен наночастицами Al_6Mn , субмикроструктурная структура, сформированная при ИПД, остается стабильной при отжиге в интервале температур 250–300 °С, и сплав демонстрирует низкотемпературную сверхпластичность с удлинениями, превышающими 400 % и коэффициентом скоростной чувствительности около 0,3 в интервале скоростей деформации $5.6 \times 10^{-4} - 2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Наибольшее удлинение равно 620 % было достигнуто при температуре 275 °С и скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, субмикроструктурная структура, низкотемпературная сверхпластичность, интенсивная пластическая деформация (ИПД).

LOW-TEMPERATURE SUPERPLASTICITY OF AL-MG-MN ALLOY PROCESSED BY SPD

Nikulin I. A., Kipelova A. Y.

Belgorod State University, Belgorod, Russia (308015 Belgorod, street Pobeda, 85), e-mail: nikulin_ilya@bsu.edu.ru

The possibility to attain superplasticity in the commercial aluminum alloy 1561 through the development of submicrocrystalline structure by the severe plastic deformation (SPD) by was examined. It was shown that submicrocrystalline structure with an average grain size of 1 μm can be developed in sheets of the 1561 aluminum alloy by severe plastic deformation through equal channel angular pressing and isothermal rolling. As a result of the stabilization of grain boundaries of nano-particles Al_6Mn , submicrocrystalline structure formed by SPD remained stable during annealing in the temperature range of 250–300 °C and the alloy shows a low-temperature superplasticity with elongation greater than 400% and the coefficient of strain rate sensitivity of about 0.3 strain rate $5.6 \times 10^{-4} - 2.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. The highest elongation of about 620 % was achieved at 275 °C and strain rate of about $5.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Keywords: Al-Mg-Mn alloy, submicrocrystalline structure, low- temperature superplasticity, severe plastic deformation.

Введение

В современной транспортной промышленности отмечается интерес к сплавам системы Al–Mg, обладающим средней прочностью, высокой коррозионной стойкостью и свариваемостью [2]. Однако низкая, по сравнению со сталями глубокой вытяжки, формовость сплавов Al–Mg значительно ограничивает широкое применение листового алюминия в изделиях сложной формы и увеличивает их цену. Этот недостаток может быть устранен при внедрении в производство конструкций сложной формы, методов формовки, основанных на эффекте сверхпластичности (СП) материалов [1,6]. В настоящее время применение к алюминиевым сплавам СП формовки в промышленных масштабах

экономически не выгодно, так как микроструктуры, получаемые стандартными термомеханическими обработками, обеспечивают проявление СП при низких скоростях ($<10^{-4} \text{ с}^{-1}$) и высоких температурах ($>0.6T_m$) деформации [4,10].

Известно [4], что уменьшение зерен алюминиевых сплавов до субмикроструктурного (СМК) размера ($d \leq 1 \text{ мкм}$) может сдвинуть диапазон СП к более низким температурам и высоким скоростям деформации, что является важным для применения СП в промышленности. Ряд исследований, посвященных СП Al–Mg сплавов, показывают [5,8,9], что высокоскоростная сверхпластичность (ВССП) и низкотемпературная сверхпластичность (НТСП) может быть обнаружена в алюминиевых сплавах с СМК структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией (ИПД) равноканальным угловым (РКУ) прессованием. Как правило, ВССП и НТСП обнаруживали в алюминиевых сплавах содержащих скандий, который образует частицы Al_3Sc , облегчающие формирование СМК зерен при ИПД и сдерживающие рост зерен при СП деформации [5,8,9]. Однако высокая цена скандия ограничивает промышленное применение этих сплавов до ряда компонентов авиационной промышленности. В связи с этим важной задачей является разработка методов, обеспечивающих формирование СМК структур РКУ прессованием в безскандиевых промышленных сплавах Al–Mg. Ранее было показано [7], что стабильная СМК структура может быть получена в сплавах Al–Mg–Mn при выделении частицы Al_6Mn размером 25 нм, которые так же эффективны для формирования СМК структур при ИПД, как и частицы Al_3Sc . Мы предполагаем, что сплав Al–Mg–Mn с стабильной СМК структурой способен к СП при низких температурах и высоких скоростях деформации.

Цель данной работы заключалась в достижении ВССП и НТСП в листах промышленного алюминиевого сплава 1561, обработанного РКУ прессованием и изотермической прокаткой.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использовали слиток промышленного алюминиевого сплава 1561 (Al–5.4 %Mg–0.5 %Mn–0.1 %Zr–0.12 %Si–0.014 %Fe (вес. %)), отожженный при $360 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 часов для выделения наноразмерных частиц Al_6Mn . Вырезанные из слитка заготовки подвергали 10 циклам РКУ прессования при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ в матрице с углами каналов $\Phi \sim 90 \text{ }^\circ$ and $\Psi \sim 1 \text{ }^\circ$. Прессованные заготовки прокатывали в листы в изотермических условиях при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ с обжатием 85 %.

Для исследования СП характеристик использовали вырезанные из прокатанных листов плоские образцы с длиной рабочей части 6 мм и сечением $1,4 \times 3 \text{ мм}^2$. Испытания растяжением проводили в интервале температур $225\text{--}325 \text{ }^\circ\text{C}$ и интервале скоростей деформации $5.6 \times 10^{-4} \text{ -- } 2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Направление растяжения совпадало с направлением

прокатки. Коэффициент скоростной чувствительности определяли методом переключения скоростей [1].

Изменения микроструктуры исследовали в плоскости прокатки. Методы просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и анализа дифракции отраженных электронов (ДОЭ) были описаны ранее [7]. На картах ДОЭ высокоугловые границы (ВУГ) и малоугловые границы указаны черными и белым линиями. Границы с углом разориентировки более 15° идентифицировали как ВУГ.

Результаты исследования и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования и анализ ДОЭ показали, что после ИПД в листах сплава 1561 формируется неоднородная микроструктура (рис. 1а). Одним из компонентов структуры являются равноосные зерна размером около 1 мкм, окруженные ВУГ (рис. 1а). Другим компонентом структуры являлись сильно вытянутые крупные зерна, содержащие в теле субзерна. Доля ВУГ порядка 0,65 и средний угол разориентировки около 26° свидетельствуют о формировании в сплаве 1561 частично рекристаллизованной микроструктуры. После ИПД в сплаве были обнаружены частицы Al_6Mn размером около 45 нм (рис. 1б), объемная доля которых составляла 0,025. В тоже время частицы Al_3Zr не были обнаружены. Ранее сообщалось, что цирконий остается в пересыщенном твердом растворе после гомогенизационного отжига [7], так как для выделения частиц Al_3Zr необходим отжиг при $450\text{--}500^\circ\text{C}$ в течение, как минимум, 200 часов [3]. Таким образом, микроструктуру, формирующуюся в сплаве 1561 при РКУ прессовании с изотермической прокаткой, можно характеризовать как частично рекристаллизованную СМК структуру с высокой долей наночастиц Al_6Mn .

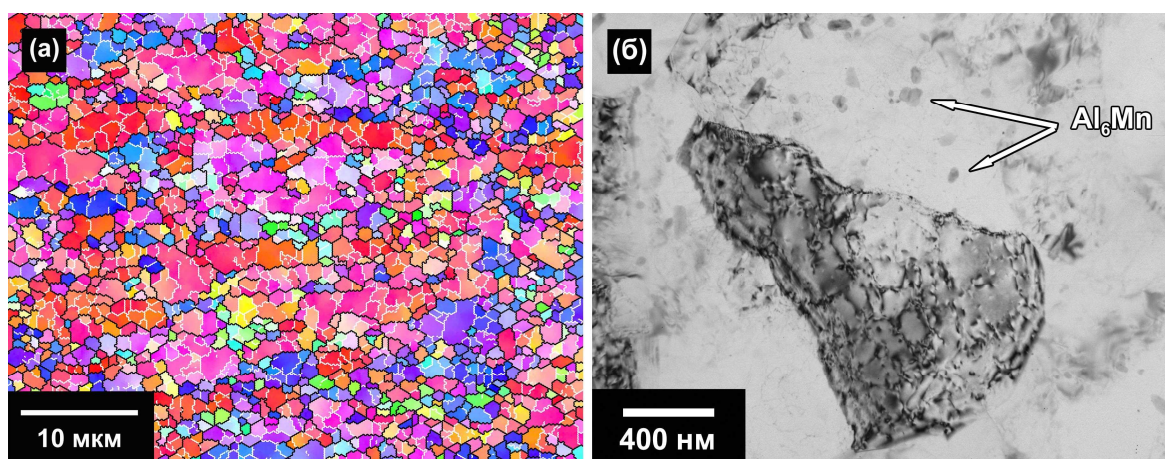


Рисунок 1. Микроструктура сплава 1561 после РКУ прессования с изотермической прокаткой. (а) типичная карта ДОЭ, (б) ПЭМ

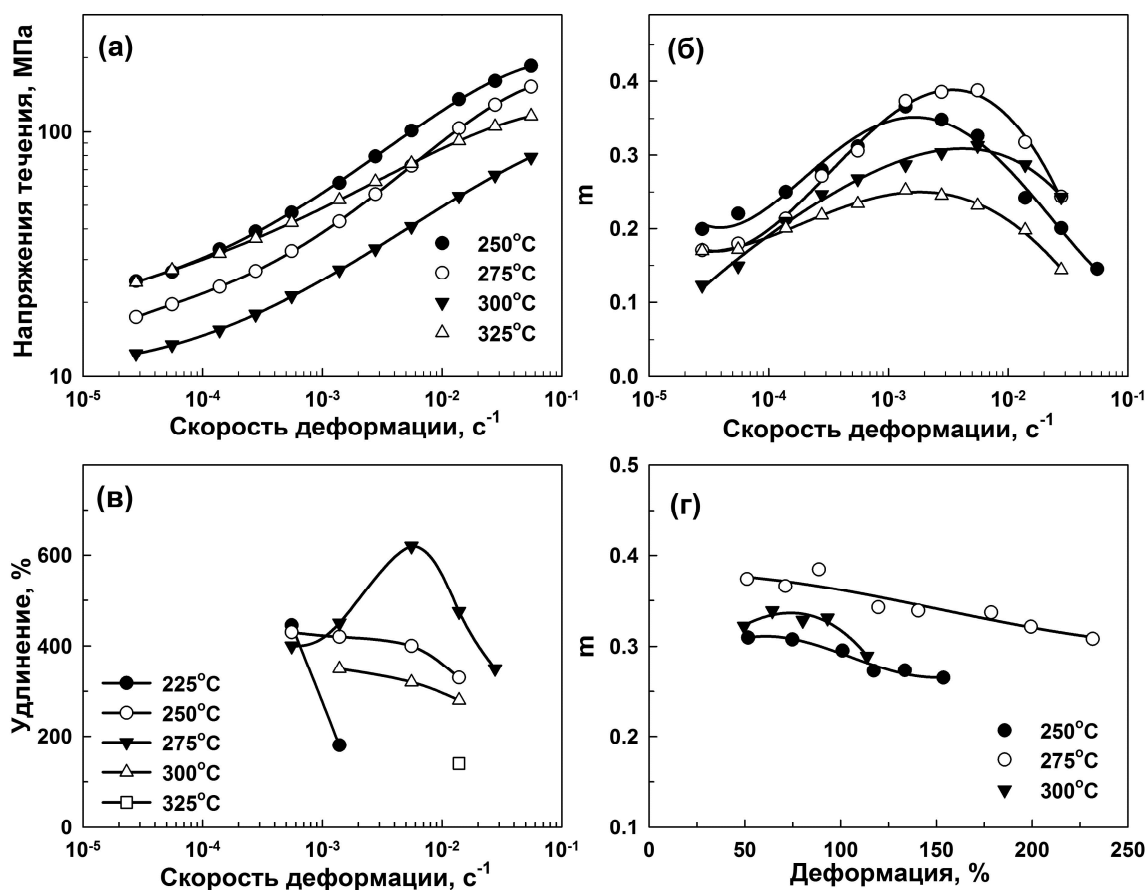


Рисунок 2. Влияние скорости деформации на напряжения течения (а), коэффициент скоростной чувствительности (б) и удлинения до разрушения (в). Влияние степени деформации на коэффициент скоростной чувствительности (г)

На рисунках 2а–2в представлены зависимости напряжений течения, коэффициента скоростной чувствительности, m , удлинений до разрушения, δ , от скорости деформации полученные при растяжении сплава в интервале температур 250–300 °С при начальной скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Очевидно, что в исследуемом интервале температур зависимость напряжений течения от скорости деформации имеет характерный для СП сплавов «сигмоидальный» вид с тремя характерными для СП материалами интервалами деформации [1]. Во втором интервале $m \geq 0.3$ и $\delta \geq 300\%$. Умеренные удлинения порядка 420 % были обнаружены при скорости деформации $5.6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и температуре 225 °, которая соответствует 0,36Tm сплава 1561. При 275 °С максимум удлинений 620 % и наибольший коэффициент скоростной чувствительности 0,4 были обнаружены при скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Стоит отметить, что при 275 °С значения $m \approx 0.33$ и $\delta \approx 480\%$ были обнаружены при скоростях деформации более 10^{-2} с^{-1} , что свидетельствует о наличии в сплаве 1561 ВССП при относительно низких температурах.

Рис. 2 г показывает зависимость коэффициента скоростной чувствительности от степени деформации при различных температурах. Значения m понижаются с увеличением степени деформации, что может указывать на снижение вклада механизма зернограничного проскальзывания в деформацию и на обусловленный деформацией рост зерен [1].

Эволюцию СМК структуры сплава 1561 в процессе отжига и СП деформации изучали в области захватов и в рабочей части, соответственно. Размер кристаллитов после отжига L_0 , СП деформации, L_d , коэффициент формы зерен, K_d , и доля ВУГ $\Sigma_{ВУГ}$, приведены в таблице 1. Средний размер зерен около 1,1 мкм остается неизменным в интервале температур 250–300 °С, свидетельствуя о стабильности СМК структуры сплава 1561 в условиях статического отжига. Частично рекристаллизованная микроструктура, образовавшаяся в сплаве 1561 при ИПД, остается практически неизменной при отжиге до 275 °С (рис. 3а), в то же время отжиг при 300 °С увеличивает однородность СМК структуры. Доля ВУГ увеличивается с 0,65 до 0,79 с увеличением температуры от 250 до 300 °С.

Таблица 1. Параметры микроструктуры формирующейся при статическом отжиге и при СП деформации сплава 1561, деформированного до разрушения при скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ в интервале температур 250–300 °С

| T, °С | 250 | 275 | 300 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| δ , % (эквивалентное время отжига в области захватов, мин) | 400 (29) | 620 (37) | 320 (27) |
| L_0 , мкм | 1.0 | 1.1 | 1.1 |
| L_d , мкм* | 1.45/0.97 | 1.8/1.04 | 1.94/1.26 |
| K_d | 1,5 | 1,73 | 1,53 |
| $\Sigma_{ВУГ}$ (область захватов) | 0.65 | 0.68 | 0.79 |
| $\Sigma_{ВУГ}$ (рабочая часть) | 0.93 | 0.94 | 0.91 |

*числитель и знаменатель размер зерен в продольном и поперечном направлении.

В процессе СП деформации в интервале 250–300 °С в рабочей части образцов было обнаружено формирование полностью рекристаллизованной микроструктуры. Доля ВУГ увеличена по сравнению с областью захватов (таблица 1, рис. 3). Рост зерен, обусловленный деформацией, имеет место в рабочей части образца, приводя к образованию рекристаллизованной микроструктуры, состоящей из зерен вытянутых в направлении растяжения (рис. 3б). Большие значения K_d и низкие значения m (рис. 2г) свидетельствуют о значительном вкладе механизма дислокационного скольжения и низком вкладе ЗГП в общую деформацию [1].

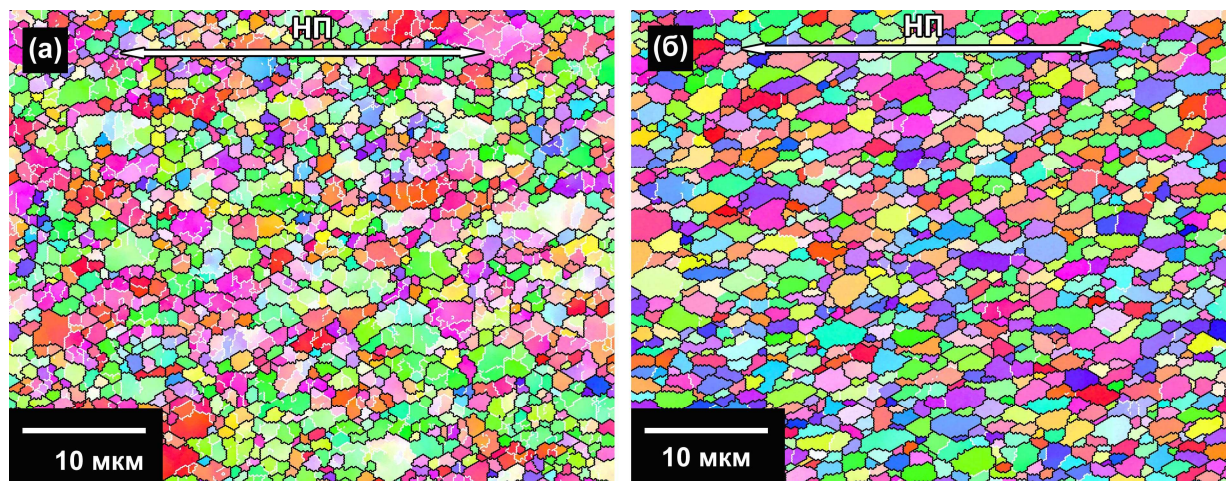


Рисунок 3. Карты ДОЭ микроструктур сплава 1561 после СП деформации при 275 °С и $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$: (а) область захватов, (б) рабочая часть

Результаты, представленные в данной работе, показывают, что двух-ступенчатая ИПД, состоящая из РКУ прессования и изотермической прокатки пригодна для производства СП листов с размером кристаллитов около 1 мкм из сплава 1561. Эта микроструктура остается стабильной во время отжига при температурах СП деформации, а сплав демонстрирует наличие НТСП и ВССП с умеренными удлинениями порядка 420 % в исследованном температурно-скоростном интервале. Наибольшее удлинение равное 620 % было достигнуто при скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и температуре 275 °С. Ранее подобные СП характеристики достигали в сплавах Al–Mg, содержащих скандий и/или цирконий [5,8,9]. Сплав 1561 содержит наноразмерные частицы Al_6Mn , которые в интервале температур 250–300 °С эффективно сдерживают рост зерен при статическом отжиге, как и частицы $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ [7]. Поэтому сплав 1561 с такой СМК структурой способен к проявлению СП при относительно низких температурах и высоких скоростях деформации. Однако очевидно, что дисперсоиды Al_6Mn не способны сдерживать рост зерен в условиях СП деформации. Рост зерен снижает вклад ЗПП в деформацию сплава 1561, уменьшая СП удлинения. Как результат сплав демонстрирует умеренные по сравнению со сплавами Al–Mg, содержащими скандий и/или цирконий, показатели СП при низких температурах и высоких скоростях.

Заключение

1. Обнаружено, что двухступенчатая ИПД, включающая РКУ прессование и изотермическую прокатку, пригодна для формирования в листах промышленного сплава 1561 СМК структуры с размером зерен 1 мкм.
2. Сплав 1561 с СМК структурой проявляет признаки ВССП с удлинением около 480 % и коэффициентом скоростной чувствительности 0,3 при скорости деформации $1.4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и

относительной температуре 275 °С. Максимальное удлинение 620 % обнаружено при той же температуре и скорости деформации $5.6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

3. При температуре 225 °С и скорости деформации $5.6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ сплав проявляет признаки НТСП с удлинением около 420 %.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Кайбышев О. А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
2. Davis J. R. Aluminum and aluminum alloys. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1993. – 783 p.
3. Jia Z., Hu G., Forbord B., Solberg J. K. Effect of homogenization and alloying elements on recrystallization resistance of Al–Zr–Mn alloys // Materials science and engineering: A. – 2007. №444. – P. 284-290.
4. Kawasaki M., Langdon T. G. Principles of Superplasticity in Ultrafine-Grained Materials // Journal of materials science. – 2007. – № 42. – P. 1782–1796.
5. Musin F., Kaibyshev R., Motohashi Y. Superplastic Behavior and Microstructure Evolution in a Commercial Al-Mg-Sc Alloy Subjected to Intense Plastic Straining // Metallurgical and materials transactions A. – 2004. – №35A. – P. 2383–2392.
6. Nieh T. G., Wadsworth J., Sherby O. D. Superplasticity in Metals and Ceramics, first ed. – New York: Cambridge University Press, 1997. – 270 p.
7. Nikulin I., Kipelova A., Malopheyev S. Effect of second phase particles on grain refinement during equal-channel angular pressing of an Al–Mg–Mn alloy // Acta materialia. – 2012. – №60. – P. 487–497.
8. Park K.-T., Hwang D.-Y., Chang S.-Y. Low-Temperature Superplastic Behavior of a Submicrometer-Grained 5083 Al Alloy Fabricated by Severe Plastic Deformation // Metallurgical and materials transactions A. – 2002. – № 33A. – P. 2859–2867.
9. Park K.-T., Hwang D.-Y., Lee Y.-K. High strain rate superplasticity of submicrometer grained 5083 Al alloy containing scandium fabricated by severe plastic deformation // Materials science and engineering: A. – 2003. – № 341. – P. 273–281.
10. Takayama Y., Itoh T., Kato H. Watanabe H. Deformation and Fracture at High Temperatures in an Al–Mg–Mn Alloy Sheet Consisting of Coarse- and Fine-Grained Layers // Materials transactions. – 2002. – Vol.43. – №10. – P. 2378–2384.

Рецензенты:

Кайбышев Рустам Оскарович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Материаловедения и нанотехнологий», ФГАОУ ВПО "Белгородский государственный национальный исследовательский университет", г. Белгород.

Иванов Олег Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, директор ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов», ФГАОУ ВПО "Белгородский государственный национальный исследовательский университет", г. Белгород.