

Научная статья

УДК 669.71

СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Mg–Si С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

**Андрей Геннадьевич Мочуговский¹, Маджид Эсмаили Гайумабади,
Анастасия Владимировна Михайловская**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Россия

¹ *mochugovskiy@mail.ru*

Аннотация. В работе были исследованы структура и свойства сплавов системы Al–Mg–Si с добавками эвтектикообразующих и дисперсоидообразующих элементов. Показано, что введение Fe и Ni, либо Y совместно с малой добавкой (0,1–0,2) % Sc и 0,2 % Zr, приводит к формированию в листах после простой термомеханической обработки гетерогенной структуры с бимодальным распределением частиц вторых фаз по размерам и наибольшим показателям сверхпластичности с удлинением более 400 % в широком диапазоне скоростей и температур деформации.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, редкоземельные металлы, сверхпластичность, механические свойства, микроструктура

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20–79–00269).

Original article

SUPERPLASTICITY OF ALLOYS OF THE AL–MG–SI SYSTEM WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE

**Andrey Gennadevich Mochugovskiy¹, Majid Esmaili Gayumabadi,
Anastasiya Vladimirovna Mixaylovskaya**

National research technological university “MISIS”, Moscow, Russia

¹ *mochugovskiy@mail.ru*

Abstract. The work investigated the structure of and properties of the Al–Mg–Si-based alloy doped with eutectic-forming and dispersoid-forming elements have been studied in current work. It was revealed that complex additions of Fe and Ni, or Y with (0,1–0,2) % Sc and 0,2 % Zr provided the heterogeneous structure with a bimodal particle size distribution in sheets after simple thermomechanical treatment. The obtained sheets exhibited superplasticity with an elongation to failure of more than 400 % in a wide range of strain rates and temperatures.

Keywords: aluminum alloys, rare earth metals, superplasticity, mechanical properties, microstructure

Funding: this work was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 20–79–00269).

Сплавы системы Al–Mg–Si широко используют в авиации и автомобилестроении благодаря удачному сочетанию низкой плотности и сравнительно высоких механических характеристик, что особенно важно для тонкостенных изделий. Ввиду значительного упрочняющего эффекта, обеспечиваемого фазами β' , β'' (метастабильные модификации Mg_2Si -фазы), при старении данные сплавы относятся к группе термически упрочняемых.

Благодаря хорошим механическим свойствам при комнатной температуре и низкой критической скорости закалки сплавы на основе системы Al–Mg–Si интересны с точки зрения производства деталей сложной формы методом сверхпластической формовки (СПФ). Однако по причине низкой концентрации растворенных легирующих элементов в твердом растворе измельчение зерна в сплавах данной системы затруднено, а динамический рост зерна при повышенных температурах сильно выражен, что осложняет достижение состояния сверхпластичности. Перспективным способом обеспечения сверхпластичного состояния в алюминиевых сплавах является создание гетерогенной структуры с бимодальным распределением частиц избыточных фаз по размерам. Крупные частицы, являющиеся результатом фрагментации при термомеханической обработке фаз кристаллизационного происхождения (с размером 0,5–2,0 мкм) измельчают зерно за счет эффекта предпочтительного зарождения новых зерен при рекристаллизации [1], в то время как наноразмерные частицы (дисперсоиды), выделяющиеся в процессе распада пересыщенного твердого раствора при термообработке, стабилизируют границы зерен в соответствии с механизмом Зинера [2].

Наиболее эффективными дисперсоидообразующими элементами являются Sc и Zr, которые формируют при распаде твердого раствора

дисперсоиды со структурным типом $L1_2$. Особое внимание при формировании гетерогенной структуры отводится термической обработке слитков. Температура термической обработки для сплавов, содержащих Sc и Zr, находится как правило в интервале 300–450 °С.

В рамках работы были рассмотрены сплавы системы Al–Mg–Si–(Cu) с добавками Fe, Ni, Y, Er, Ce, Sc и Zr.

По результатам анализа полученного объема данных наиболее перспективными среди рассмотренных являются сплавы, легированные совместно дисперсоидообразующими элементами (0,1–0,2) % Sc и 0,2% Zr и эвтектикообразующими элементами (2–4) % Ni, 1 % Fe и 1 % Ni, а также 0,5 % Y. Выбранные сплавы проявляют сверхпластичность с удлинением более 400 % в широком диапазоне скоростей деформации и температур.

Список источников

1. Humphreys F.J. The nucleation of recrystallization at second phase particles in deformed aluminium // *Acta Metall.* 1977. V. 25. P. 1323–1344.
2. Manohar P.A., Ferry M., Chandra T. Five Decades of the Zener Equation // *ISIJ Int.* 1998. V. 38 P. 913–924.