



УДК 669.715:539.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВА Al-8,2Mg-4,7Si С ДОБАВКОЙ ХРОМА

А.В. Михайловская, В.К. Портной

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский пр-т, 4, Москва, 119049, Россия, e-mail: mihaylovskaya@misis.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние размера частиц эвтектической фазы Mg_2Si и малой добавки хрома (0,2 %) на зеренную структуру и показатели сверхпластичности сплава Al-8,2%Mg-4,7%Si. Показано, что добавка 0,2% хрома в сплав обеспечивает удлинения 600% и низкий уровень напряжения течения (3-4МПа) при постоянной скорости деформации $3 \times 10^{-3} \text{с}^{-1}$.

Ключевые слова: сверхпластичность, алюминиевые сплавы, зеренная структура.

Введение

Сегодня развитие отраслей промышленности связано с возрастающим применением наукоемких и энергоэффективных технологий получения изделий. Разработка и создание перспективных конструкций требуют расширения возможностей формоизменения за счет выхода на оптимальные режимы и условия деформации, применения рациональных способов и схем формообразования. Решить задачу получения качественных изделий можно используя технологию сверхпластической листовой формовки [1]. Метод обеспечивает возможность изготовления сложных по форме и рельефу деталей с чрезвычайно большими степенями общей и местной деформации за одну технологическую операцию. Сверхпластическая формовка является наукоемкой технологией и эффективным способом изготовления деталей сложной формы из листов. Применение этой технологии позволяет значительно снизить расходы на изготовление деталей за счет уменьшения трудоемкости и сокращения затрат на технологическое обеспечение, в первую очередь, штамповую оснастку и уменьшения энергозатрат при производстве изделий. Реализация способа не возможна без применения листов сплавов со специально подготовленной структурой, обеспечивающей сверхпластичность. Современные исследователи решают задачу оптимизации свойств, используя материалы, полученные по специальным технологиям, таким как направленная кристаллизация, гранульные технологии, механическое легирование [2-4], методы интенсивной пластической деформации [5,6] и т.д. Для обеспечения стабильной микроструктуры легируют сплавы скандием (0.1-0.3 %) и цирконием (более 0.5%) [7-9]. Высокая стоимость или сложность промышленной реализации последних существенно ограничивает их использование в производстве. Актуальным остается использование способов термомеханической обработки, обеспечивающих возможность получения листов на имеющихся в промышленности производственных мощностях. Как показывает опыт предыдущих исследований,



например [10, 11], можно получить листовой материал с высокими показателями, благодаря оптимизации состава и термомодеформационной обработки. Улучшенные показатели сверхпластичности образуются в присутствии частиц вторых фаз различной дисперсности при оптимальной их гетерогенности. Частицы обеспечивают мелкое зерно благодаря рекристаллизации из множества центров и стабильность микроструктуры. В настоящей работе исследован сплав по составу близкий к эвтектической точке квазибинарного разреза системы Al-Mg-Si с разным размером частиц эвтектических фаз, кроме того, для повышения стабильности зеренной структуры во время сверхпластической деформации, сплав легировали хромом, в количестве 0,2%. Цель данной работы заключается в исследовании влияния добавки хрома и размера частиц на зеренную структуру листов и их показатели сверхпластичности.

§1. Материал и методика исследования

В работе исследованы два сплава Al-8,2%Mg-4,7%Si (сп.1) и Al-8,2%Mg-4,7%Si-0,2%Cr (сп.2). Сплавы получали литьем в медную водоохлаждаемую изложницу размером 100 × 40 × 20 мм, со скоростью охлаждения при кристаллизации около 15 К/с. Для приготовления сплавов использовали алюминий А99, лигатуру Al-10%Cr, магний и кремний вводили в чистом виде. Гомогенизационный отжиг слитков проводили в печи электросопротивления марки Nabertherm N30/65А с вентилятором. Горячую при температуре 450°C и холодную прокатку при комнатной температуре с обжатием 60% проводили на лабораторном прокатном стане ДУО250.

Структуру образцов выявляли механической шлифовкой, с последующей струйной электрополировкой в растворе электролита 70% этилового спирта, 20% HClO₄, 10% глицерина. Для выявления зеренной структуры проводили травление в 1% водном растворе плавиковой кислоты. Структуру анализировали с использованием световой микроскопии (СМ). Количественный анализ параметров частиц и размера рекристаллизованных зерен проводили по фотографиям при помощи прикладной компьютерной программы, в каждом состоянии набирали 300-400 измерений. Доверительную вероятность принимали равной 0,95.

Показатели сверхпластичности определяли при температуре 560°C на образцах с размерами рабочей части 14 × 6 × 1 мм. Испытывали по 3 образца на точку. Для определения оптимальной скорости деформации проводили испытания со скачковым повышением скорости растяжения на испытательной машине 1231-У10, управляемой ЭВМ. Истинное напряжение течения рассчитывали из условия постоянства объема рабочей части и равномерности деформации образца, показатель скоростной чувствительности m определяли по наклону зависимости логарифма напряжения от логарифма скорости деформации. Оптимальный интервал скоростей деформации выбирали по максимальному уровню m . Испытания с постоянными скоростями деформации (1×10^{-3} и $8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) проводили до разрушения. Разброс значений по величине относительного удлинения, полученный по результатам испытаний 3-6 образцов на точку составляет 10% (относительных).

§2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Сплав 1 по составу отвечает точке квазибинарного разреза на диаграмме Al-Mg-Si. В литом состоянии в структуре сплава наблюдали эвтектические колонии ((Al)+Mg₂Si) (рис. 1). Добавка 0,2%Cr (сп. 2) не приводит к изменениям литой структуры и появлению новых фаз. Хром после кристаллизации может находиться в твердом растворе на основе алюминия благодаря ускоренной кристаллизации. Объемная доля частиц второй фазы Mg₂Si, определенная по результатам структурного анализа, составила $15\pm 1\%$, что совпадает с данными расчета, полученными при помощи программного продукта ThermoCalc (15%).

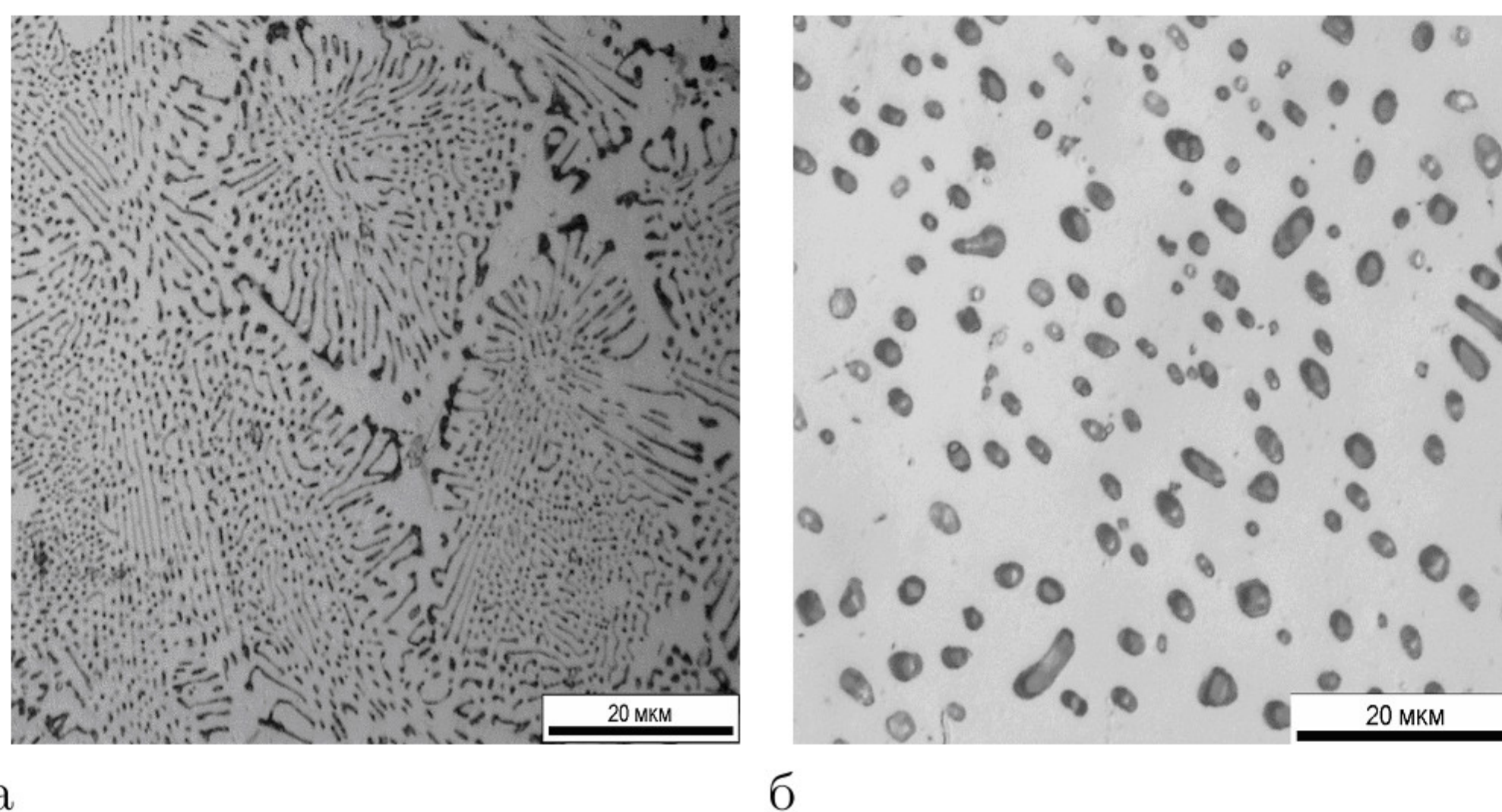


Рис. 1. Микроструктура сплава 1 Al-8,2Mg-4,7Si в литом (а) и гомогенизированном (б) (на средний размер частиц $3,1\pm 0,1$) состояниях (СМ).

После гомогенизационного отжига частицы эвтектической фазы Mg₂Si фрагментируются и сфероидизируются (рис. 1 б) и в зависимости от температуры и времени отжига имеют разный размер. После деформационной обработки сплавы представляют собой структуру состоящую из алюминиевой матрицы и равномерно распределенных частиц второй фазы Mg₂Si. Были получены листы сплава 1 с размером частиц второй фазы d : $1,5\pm 0,1$; $2,1\pm 0,1$; $3,1\pm 0,1$ и $4,2\pm 0,3$ мкм и нормальным распределением их по размерам. В листах сплава 2 размер частиц составил $1,5\pm 0,1$ мкм. Частицы в среднем имели форму близкую к сферической (коэффициент формы, определенный в холоднокатаном состоянии как отношение продольного размера к поперечному составил 1,10 – 1,15).

Зеренную структуру изучали после 20 минут отжига при температуре 560°C ($0,95T_{\text{пл}}$) имитирующего нагрев до температуры сверхпластической деформации. Средний размер зерна L в сплавах после рекристаллизации определяется размером частиц эвтектической фазы. С увеличением размера частиц размер зерна возрастает с $3,0\pm 0,2$ до $9,5\pm 0,7$ мкм (рис. 2). Добавка хрома не влияет на исходный размер рекристаллизованного зерна, размер зерна в сплаве 2 составляет $3,0\pm 0,2$ мкм.

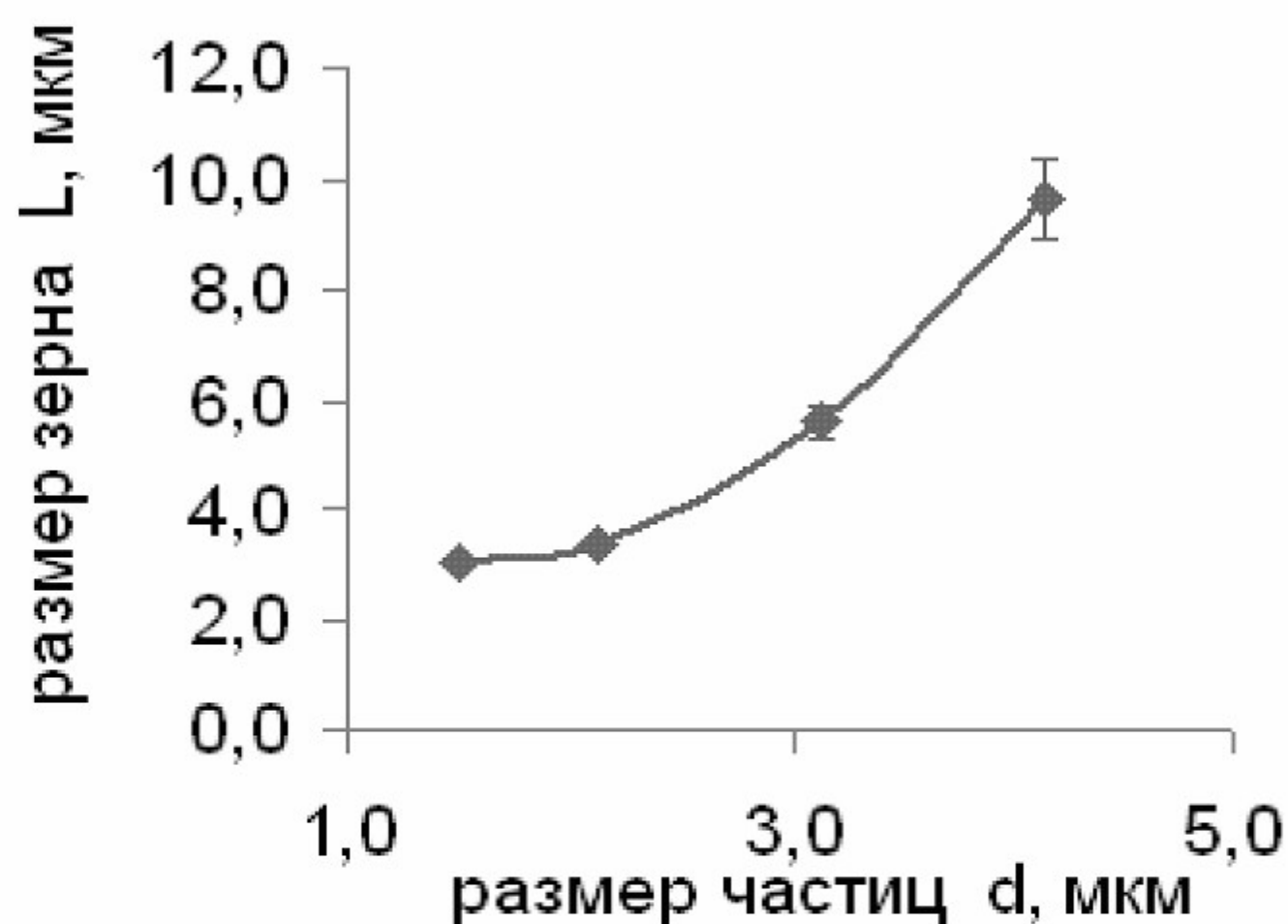


Рис. 2. Зависимость размера рекристаллизованного при температуре 560 °С в течении 20 минут зерна от размера частиц в сплаве 1 (Al-8,2Mg-4,7Si).

Величина напряжения течения, полученная по результатам испытаний со скачко-вым повышением скорости деформации сплава 1 закономерно уменьшается при уменьшении размера зерна, а наименьший уровень напряжения течения в сплаве 2 с хромом (рис. 3 а). Значение оптимальной скорости деформации соответствующее максимуму m (0,4-0,5) при размере зерна 9,6 мкм составляет $8 \times 10^{-4} \text{c}^{-1}$. Зерно размером 3,0 мкм обеспечивает оптимум скорости деформации около $(3-4) \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$. Наибольшая величина оптимальной скорости сверхпластической деформации получена в сплаве 2 с 0,2%Cr – $(5 - 8) \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$ (рис. 3 б).

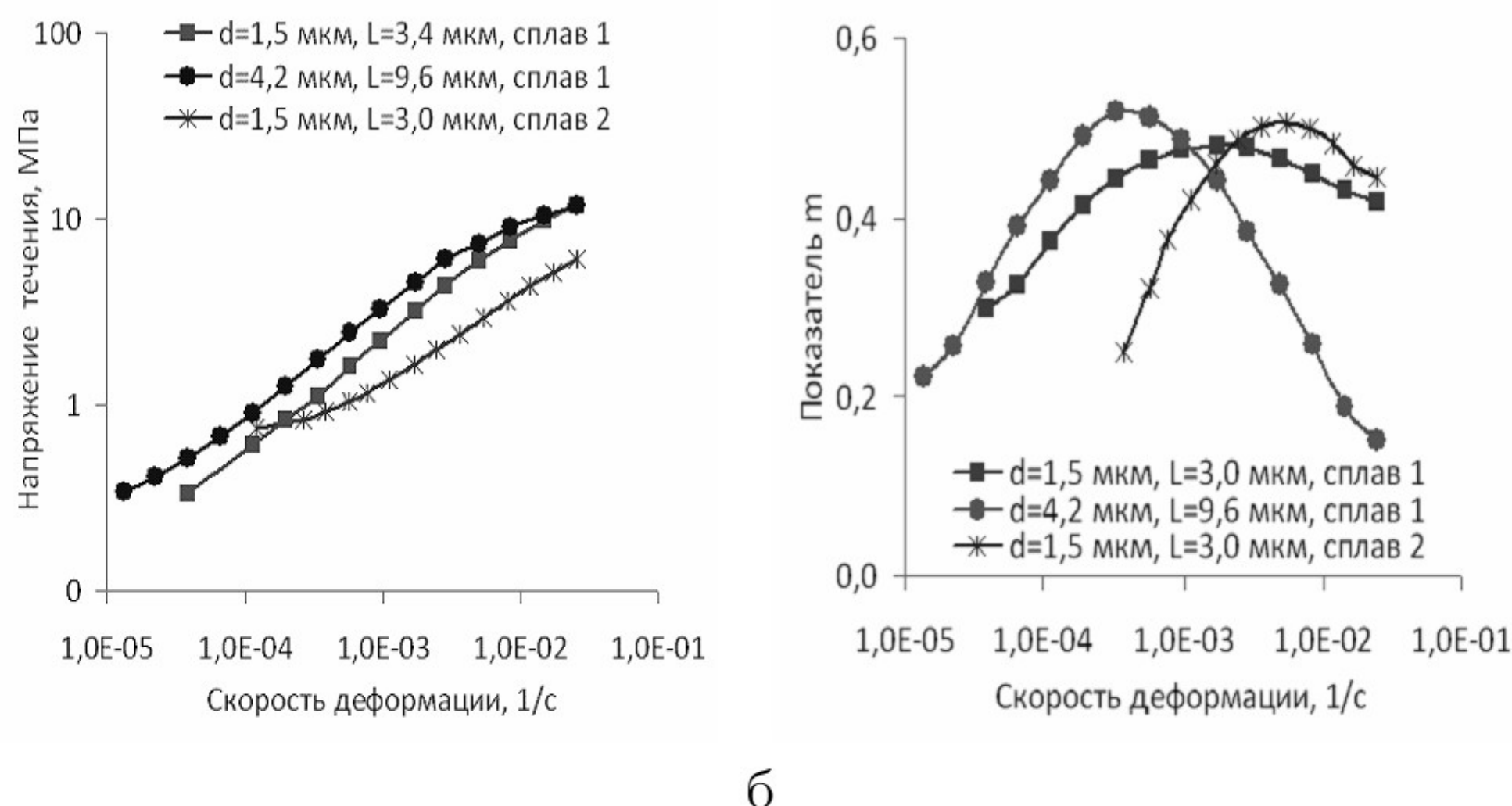


Рис. 3. Зависимости напряжения течения: (а) и показателя скорости чувствительности m , (б) от скорости деформации для сп.1 с разными структурными параметрами и сп. 2 (указаны в легенде).

Образцы всех сплавов испытывали при постоянных скоростях деформации 1, 3 и $5 \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$ (табл. 1). Наибольшая величина относительного удлинения 600% получена в сплаве 2 содержащем 0,2% Cr при постоянной скорости деформации $3 \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$.

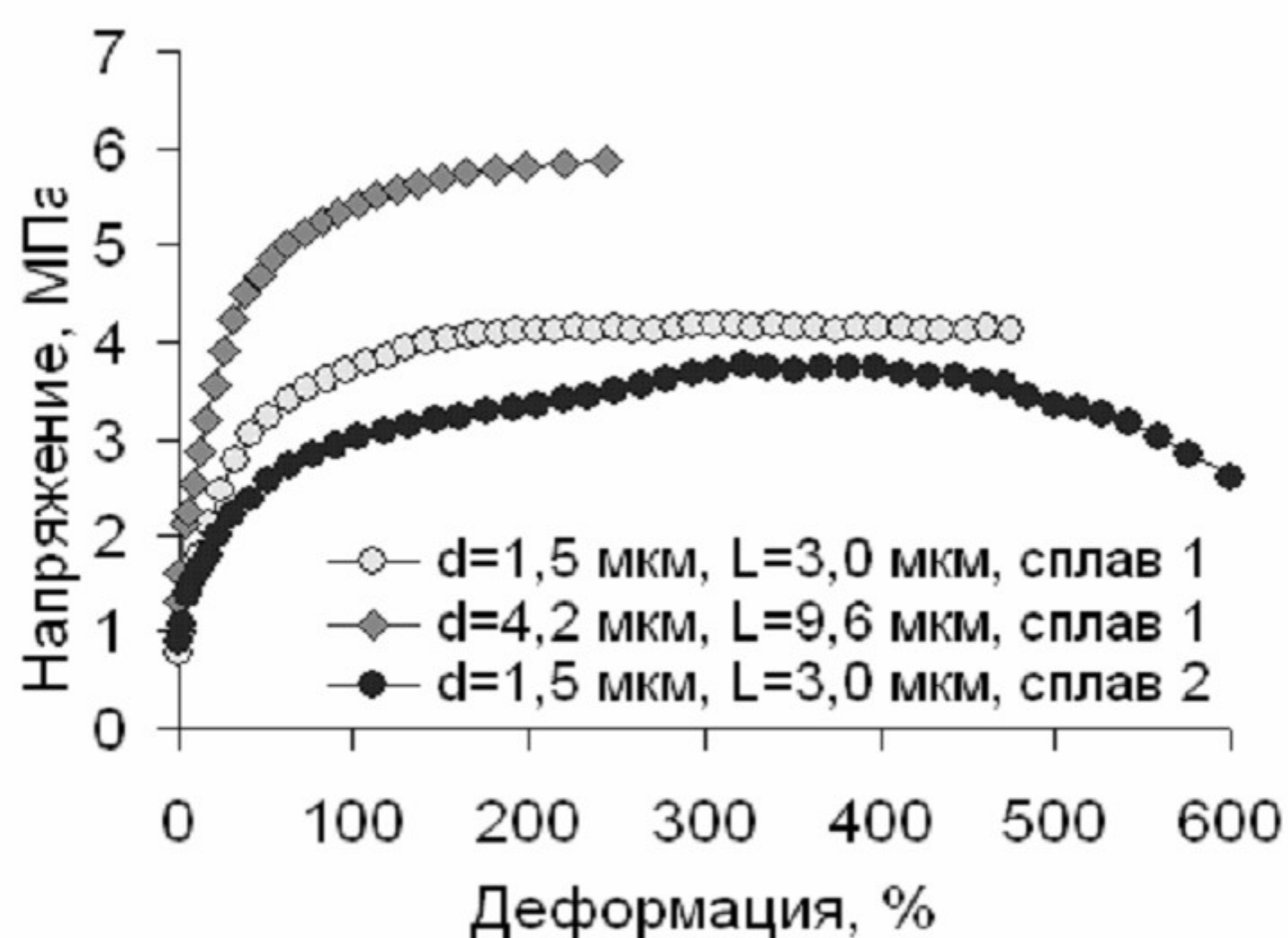


Рис. 4. Зависимости напряжения течения от степени сверхпластической деформации при скорости деформации $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ для сп.1 с разными структурными параметрами и сп.2 (указаны в легенде).

Добавка хрома обеспечивает не только более продолжительное устойчивое течение, но и наименьшее напряжение течения – при скорости деформации $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ его величина составляет (3 – 4) МПа (рис. 4). Объяснить улучшение показателей сверхпластичности в присутствии хрома можно увеличением стабильности зеренной структуры, благодаря выделению во время термомодеформационной обработки дисперсных частиц хромосодержащей фазы.

Заключение

Исследована микроструктура и показатели сверхпластичности Al-8,2%Mg-4,7%Si с разным размером частиц второй фазы Mg_2Si эвтектического происхождения, а так же с добавкой 0,2%Cr.

Показано, что размер рекристаллизованного зерна около 3,0 мкм обеспечивают 15% частиц фазы Mg_2Si средним размером 1,5 мкм, при этом добавка 0,2%Cr не изменяет средний размер рекристаллизованного зерна в сплаве.

Наилучшие показатели сверхпластичности получены в Al-8,2%Mg-4,7%Si-0,2%Cr: относительное удлинение 600%, напряжение течения (3 – 4) МПа при постоянной скорости деформации $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (Госконтракт №14.740.12.0865 по обобщенной теме «Исследование новых конструкционных и функциональных материалов и технологий их обработки») на оборудовании Центра коллективного пользования «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» НИУ «БелГУ»



Литература

1. Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. Пейтона Н., Гамильтона К.: Пер. с англ. – М.:Металлургия, 1985. – 312 с.
2. Kim W.J. Variation of strain-rate sensitively exponent as a function of plastic strain in the PM processed superplastic 7475Al+0.7Zr alloy // *Materials Science and Engineering*. – 2000. – A277. – P.134-142.
3. Kitazono K., Sato E. Internal Stress Superplasticity In Directionally Solidified Al-Al₃Ni Eutectic Composite // *Acta mater.* – 1999. – 47;1. – P.135-142.
4. Ferry M., Munroe P.R. Recrystallization kinetics and final grain size in a cold rolled particulate reinforced Al-based MMC / *Composites: Part A*. – 2004. – 35. – P.1017-1025.
5. Mishrai R.S., Mahoney M.W., McFadden S.X., Mara N.A. and Mukherjee A.K. // High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 al alloy // *Scripta mater.* – 2000. – 42. – P.163-168.
6. Slamova M., Homola P., Karlík M. Thermal stability of twin-roll cast Al-Fe-Mn-Si sheets accumulative roll bonded at different temperatures // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – 462. – P.106-110.
7. Bate P.S., Humphreys F.J., Ridley N., Zhang B. Microstructure and texture evolution in the tension of superplastic Al-6Cu-0.4Zr // *Acta Materialia*. – 2005. – 53. – P.3059-3069.
8. Katsas S., Dashwood R., Gimes R., Jackson M., Todd G., Henein H. Dinamic recrystallisation and superplasticity in pure aluminium with zirconium addition // *Material Science and Engineering A*. – 2007. – 444. – P.291-297.
9. Ihara K., Miura Y. Dynamic recrystallization in Al-Mg-Sc alloys // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – 387-389. – P.647-650.
10. Михайловская А.В., Головина А.А., Портной В.К. Исследование сверхпластичности сплава АЦ6Н4 // *МиТОМ*. – 2006. – № 9(615). – С.39-43.
11. Михайловская А.В., Левченко В.С., Сагалова Т.Б., Портной В.К. Влияние добавок циркония, хрома и никеля на структуру и показатели сверхпластичности сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu // *Известия вузов. «Цветная металлургия»*. – 2008. – №4. – С.39-44.



RESEARCH OF SUPERPLASTICITY BEHAVIOR OF Al-8,2Mg-4,7Si ALLOY WITH CHROMIUM ADDITION

A.V. Mihaylovskaya, V.K. Portnoy

National University of Science and Technology «MISIS»,
Lenin av., 4, Moscow, 119049, Russia. e-mail: mihaylovskaya@misis.ru

Abstract. The structure and superplastic behavior of Al-8,2% Mg-4,7%Si alloy containing different size of eutectic particles Mg₂Si phase and with chromium addition (0,2%) are studied. It has shown that the alloy with 0,2%Cr has very large elongation up to 600% and low stress flow (3-4 MPa) by the $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ strain rate.

Keywords: superplasticity, aluminium alloys, grain structure.