

Структура и прочностные характеристики деформируемых сплавов Al—5Mg, легированных скандием, цирконием и ниобием

Ю. В. Мильман, Н. А. Ефимов, Н. П. Захарова,
Н. И. Даниленко, А. О. Шаровский

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: milman@ipms.kiev.ua

Исследована возможность улучшения механических характеристик сплавов Al—5Mg дополнительным микролегированием комплексами Sc + Zr и Sc + Zr + Nb. Полуфабрикаты исследованных сплавов получали в виде прутков диаметром 6 мм. Показано, что микролегирование базового сплава скандием и цирконием кардинально изменяет тип субструктуры экструдированных полуфабрикатов. Во всех сплавах, легированных комплексами Sc + Zr и Sc + Zr + Nb, формируется дислокационная структура с размером ячеек 0,4—0,5 мкм. Опытные сплавы, микролегированные указанными комплексами, имеют прочностные характеристики на 60—70% выше таковых сплавов типа AMg при сохранении удовлетворительной пластичности.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микролегирование, дислокационная структура, прочность, пластичность.

Введение

Сплавы алюминия, удельная прочность которых превышает таковую стали, широко используют в современной технике, особенно в транспортной отрасли. На современном этапе развития до- и сверхзвуковой авиации алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами в самолетостроении. Кроме этого, разные типы сплавов алюминия применяют при создании космической техники, современных автомобилей и кораблей.

Среди широкого спектра алюминиевых сплавов одними из самых используемых являются деформируемые сплавы Al—5Mg, в том числе и хорошо известные сплавы типа AMg5. Высокая прочность, повышенная коррозионная стойкость и возможность получения надежных сварных соединений сделала такие сплавы одними из наиболее востребованных при конструировании транспортных средств различного назначения. Однако все возрастающие требования современного машиностроения делают актуальной проблему дальнейшего повышения прочностных характеристик сплавов Al—5Mg. Одним из способов повышения уровня прочностных характеристик деформируемых сплавов алюминия, в том числе и сплавов типа AMg5, является их легирование скандием и редкоземельными металлами [1].

Цель настоящего исследования — изучить влияние дополнительного легирования скандием, цирконием и ниобием на структуру и механические свойства деформируемых сплавов типа Al—5Mg.

© Ю. В. Мильман, Н. А. Ефимов, Н. П. Захарова, Н. И. Даниленко,
А. О. Шаровский, 2015

Материалы и методика исследований

Для изготовления качественных слитков исследуемых сплавов массой 1500 г и диаметром 55 мм использовали комплекс плавильного оборудования, состоящий из высокочастотного генератора с индикатором для нагрева металла, вакуумной камеры, в которой выполнялись плавление и разлив металла, систем подвески тиглей, откочки и напуска инертного газа, размешивания жидкого металла, медной водоохлаждаемой изложницы и системы измерения температуры жидкого металла с помощью хромель-алюмелевой термопары. Плавку проводили в керамических тиглях. С целью дополнительной очистки расплав пропускали через керамические фильтры и продували аргоном. Для изготовления легированных сплавов выбраны двойные лигатуры. Для шихты использовали алюминий марки А97. Полуфабрикаты в форме прутков из опытных слитков массой 1,5 кг готовили методом экструзии. Для формирования оптимальной структуры полуфабрикатов осуществляли двухступенчатую экструзию: с $\varnothing 55$ до $\varnothing 25$ мм (степень вытяжки $\mu = 4,8$), затем с $\varnothing 25$ до $\varnothing 6$ мм (степень вытяжки $\mu = 17,4$). Экструзию проводили в температурном интервале 300—350 °С. Составы исследуемых сплавов приведены в табл. 1.

Механические свойства прутков из опытных сплавов определяли на основании данных испытаний на растяжение стандартных пятикратных образцов. Образцы испытывали на машине 1246 типа INSTRON со скоростью перемещения захватов 1 мм/мин (скорость деформации 10^{-3} с^{-1}) с записью кривой деформации. По кривым деформации рассчитывали пределы прочности σ_B и текучести $\sigma_{0,2}$ и удлинение до разрушения δ .

Структуру прутков исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскоп JEM-100CX) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр ДРОН-2.0 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении).

Результаты и их обсуждение

Стандартные нелегированные сплавы типа Al—5Mg не являются термоупрочняемыми [2]. Формирование структуры, обеспечивающей тот или иной уровень механических свойств, достигается в процессе горячей пластической деформации. Результаты ПЭМ исследования структуры экструдированного сплава базового состава без Sc приведены на рис. 1. Видно, что структура этого прутка состоит из довольно больших зерен размером 1—5 мкм (рис. 1, а). В отдельных зернах наблюдаются скопления дислокаций.

Т а б л и ц а 1. Химический состав исследуемых сплавов

Номер сплава	Химический состав, % (мас.)
1	Al—5Mg
2	Al—5Mg—0,6Mn (AMr5)
3	Al—5Mg—0,3Sc—0,15Zr
4	Al—5Mg—0,6Mn 0,3Sc—0,15Zr
5	Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb

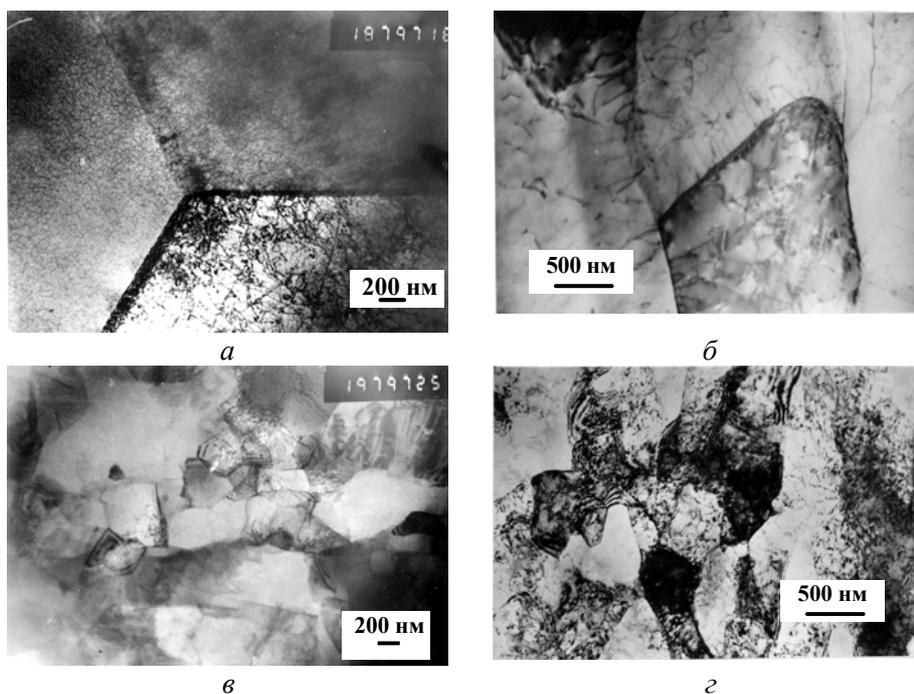


Рис. 1. Структура экструдированных прутков из сплавов Al—5Mg: *a* — Al—5Mg; *б* — Al—5Mg—0,6Mn; *в* — Al—5Mg—0,3Sc—0,15Zr; *г* — Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr.

Дополнительное легирование марганцем практически не влияет на структуру сплава после экструзии (рис. 1, *б*). Как известно, сплавы типа AlMg легируют марганцем для повышения коррозионной стойкости [3].

Легирование сплава базового состава комплексом 0,3Sc + 0,15Zr существенно изменяет характер структуры экструдированного материала (рис. 1, *в*) и приводит к формированию ячеистой дислокационной структуры (размер округлых ячеек в среднем составляет 0,4—0,5 мкм). Как видно на рис. 1, *г*, добавление в состав сплава марганца в комбинации со скандием и цирконием также обеспечивает получение дислокационной структуры после экструзии слитка. Границы ячеек узкие и имеют полосатый контраст, характерный для достаточно совершенных границ, а плотность дислокаций в объеме ячеек сравнительно невелика и они часто образуют сетки.

Следует отметить, что во всех сплавах, легированных комплексом 0,3Sc + 0,15Zr, наблюдается структура разного типа: участки с очень мелкими округлыми ячейками и участки, содержащие ячейки с несколько большим поперечным размером и вытянутые в направлении экструзии. При исследовании тонкой структуры экструдированного прутка сплава Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb установлено наличие участков с очень мелкими практически округлыми ячейками размером 0,3 мкм (рис. 2, *справа*) в областях шириной порядка 5—10 мкм и участков, содержащих ячейки с несколько большим поперечным размером, вытянутых в направлении экструзии. Размер этих ячеек в направлении экструзии в 3—6 раз больше поперечного (рис. 2, *слева*). Очевидно, этот факт можно объяснить наличием в экструдированных прутках различных



Рис. 2. Структура прутка сплава
 $\text{Al}-5\text{Mg}-0,68\text{Mn}-0,34\text{Sc}-0,25\text{Zr}-0,18\text{Nb}$.

текстурных составляющих. Явление формирования различной дислокационной структуры в текстурных компонентах с направлениями $\langle 100 \rangle$ и $\langle 211 \rangle$ вдоль оси экструзии известно для таких ГЦК металлов, как Ni и Cu [4], причем в текстурных компонентах $\langle 111 \rangle$ наблюдаются большая плотность дислокаций и ячейки с большими разориентациями кристаллической решетки.

ПЭМ исследование структуры прутков (рис. 1, *з* и 2) показало, что в сплаве $\text{Al}-5\text{Mg}-0,6\text{Mn}-0,3\text{Sc}-0,15\text{Zr}-0,18\text{Nb}$ размер равноосных ячеек несколько меньше (около 0,3 мкм), чем в сплаве $\text{Al}-5\text{Mg}-0,6\text{Mn}-0,25\text{Sc}-0,15\text{Zr}$ (около 0,4—0,5 мкм), поперечный размер вытянутых ячеек в этих сплавах 0,65 и 0,9 мкм соответственно.

Рентгеноструктурное исследование исследуемых прутков выявило небольшое уменьшение параметра кристаллической решетки в результате легирования марганцем (с 0,4073 до 0,4069 нм) и значительное возрастание уширения рентгеновских дифракционных линий вследствие комбинированного легирования скандием и цирконием. Максимальная ширина линий (422) Al наблюдается в сплавах $\text{Al}-5\text{Mg}-0,6\text{Mn}-0,3\text{Sc}-0,15\text{Zr}$ и $\text{Al}-5\text{Mg}-0,6\text{Mn}-0,3\text{Sc}-0,15\text{Zr}-0,18\text{Nb}$ (рис. 3). Увеличение ширины рентгеновских линий свидетельствует либо об уменьшении размера структурных составляющих, либо о возрастающем уровне микронапряжений.

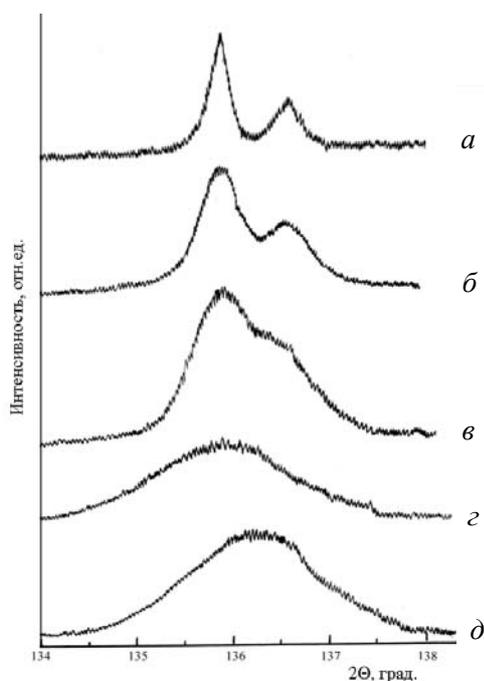


Рис. 3. Профиль рентгеновской дифракционной линии (422) (Al) в $\text{CuK}\alpha$ -излучении продольного сечения прутков: Al—5Mg (a), Al—5Mg—0,6Mn (б), Al—5Mg—0,3Sc—0,15Zr (в), Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr (г), Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb (д).

Каждый из этих факторов либо их совместное влияние должен вносить вклад в упрочнение исследованных сплавов.

Механические свойства прутков исследованных сплавов, полученных методом двойной экструзии, приведены в табл. 2. Опытные сплавы, легированные

комплексами Sc + Zr и Sc + Zr + Nb, имеют прочностные характеристики на 60—70% выше таковых стандартных сплавов типа АМг5 без скандия при сохранении удовлетворительной пластичности [2].

Анализ данных механических испытаний показал четкую связь прочностных характеристик с типом структуры экструдированных сплавов Al—5Mg. Дополнительное легирование комбинацией Sc + Zr, приводящее к формированию дислокационной структуры ячеистого типа, резко увеличивает пределы текучести и прочности исследуемых сплавов (сплавы 3—5). Легирование марганцем практически не влияет на тип субструктуры и, как следствие, на прочностные характеристики, однако существенно повышает коррозионную стойкость [2]. Самые высокие прочностные характеристики демонстрирует сплав Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb, имеющий дислокационные ячейки наименьших размеров и наибольшую плотность дислокаций.

Т а б л и ц а 2. Механические свойства прутков из сплавов типа Al—5Mg

Номер сплава	Химический состав, % (мас.)	Механические свойства		
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	Al—5Mg	167	298	30,53
2	Al—5Mg—0,6Mn	132	281	31,7
3	Al—5Mg—0,3Sc—0,15Zr	366	470	12,53
4	Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr	397	476	11,5
5	Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb	435	516	11,3

Выводы

При экструзии слитков сплавов Al—5Mg в интервале температур 300—350 °С легирование комплексами Sc + Zr и Sc + Zr + Nb приводит к изменению типа субструктуры в полученных прутках. Так, в экструдированных прутках из этих сплавов формируется дислокационная структура с размером ячеек 0,3—0,5 мкм.

Показано, что в исследуемых сплавах составов Al—5Mg—(Sc, Zr, Nb) физическое уширение рентгеновских дифракционных линий (422) алюминия в легированных сплавах в 2 раза больше, чем в базовом составе. Это обусловлено влиянием легирования комплексом Sc + Zr на увеличение степени деформационного упрочнения опытных сплавов.

Легирование марганцем практически не влияет на тип субструктуры, образовавшейся после экструзии и, соответственно, на механические характеристики. Однако, согласно литературным данным, существенно повышает сопротивление коррозии.

Опытные сплавы, легированные комплексами Sc + Zr и Sc + Zr + Nb, имеют прочностные характеристики на 17—47% выше таковых стандартных сплавов типа АМг без скандия при сохранении удовлетворительной пластичности. Самыми высокими прочностными характеристиками обладают прутки из сплава состава Al—5Mg—0,6Mn—0,3Sc—0,15Zr—0,18Nb ($\sigma_{0,2} = 435$ МПа; $\sigma_B = 516$ МПа; $\delta = 11\%$).

Электронно-микроскопические исследования структуры показали, что экструдированные прутки этого состава имеют субструктуру с наименьшим размером ячеек и наибольшей плотностью дислокаций в них.

1. *Milman Yu. V.* Scandium-effect on increasing mechanical properties of aluminum alloys // High Temperature Materials and Processes. — 2006. — **25**, No. 1—2. — P. 1—10.
2. *Белецкий В. М.* Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): (Справ.) / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; Под общ. ред. акад. РАН И. Н. Фридляндера. — К. : Коминтех, 2005. — 365 с.
3. *Пачурин Г. В.* Теоретические основы повышения коррозионной долговечности упрочненных металлов и сплавов // Успехи современного естествознания. — 2011. — № 2. — С. 95—99.
4. *Ларикив Л. Н.* Эволюция дислокационной структуры никеля при гидроэкструзии / Л. Н. Ларикив, В. Н. Днепренко // Металлофизика. — 1979. — Вып. 76. — С. 44—49.

Структура та характеристики міцності деформованих сплавів Al—5Mg, легованих скандієм, цирконієм та ніобієм

Ю. В. Мільман, М. О. Єфімов, Н. П. Захарова, М. І. Даниленко,
А. О. Шаровський

Досліджено можливість поліпшення механічних характеристик сплавів Al—5Mg додатковим мікролегуванням комплексами Sc + Zr та Sc + Zr + Nb. Напівфабрикати досліджених сплавів отримували методом подвійної екструзії зливків у вигляді прутків діаметром 6 мм. Показано, що мікролегування базового сплаву скандієм і цирконієм кардинально змінює тип субструктури екстру-

дованих напівфабрикатів. У всіх сплавах, легованих комплексами Sc + Zr та Sc + Zr + Nb, формується дислокаційна структура з розміром комірок 0,4—0,5 мкм. Досліджені сплави, мікролеговані комплексами Sc + Zr та Sc + Zr + Nb, мають характеристики міцності на 60—70% вищі за таких стандартних сплавів типу AlMg при збереженні задовільної пластичності.

Ключові слова: алюмінієві сплави, мікролегування, дислокаційна структура, міцність, пластичність.

The structure and strength characteristics of wrought Al—5Mg alloy with alloying by scandium, zirconium and niobium

Yu. V. Milman, M. O. Iefimov, N. P. Zakharova, M. I. Danylenko,
A. O. Sharovsky

The possibility of improving the mechanical characteristics of the Al—5Mg alloys by means of additional microalloying by complexes Sc + Zr and Sc + Zr + Nb is investigated. Semi-finished products of the alloys obtained by dual extrusion of ingots in rods with a diameter of 6 mm. It is shown that microalloying of base alloy by Sc and Zr cardinally changes of substructure of extruded semi-finished products. In all alloys with microalloying by complexes Sc + Zr and Sc + Zr + Nb the cellular dislocation structure with a size of cells of 0,4—0,5 microns is formed. The studied alloys microalloyed by complexes Sc + Zr and Sc + Zr + Nb have strength on 60—70% higher then standard Al—5Mg alloys with satisfactory plasticity.

Keywords: aluminum alloys, microalloying, dislocation structure, strength, plusticity.