

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК HF И ER НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ AL-MG-SC-ZR

© 2024

- Е. В. Арышенский** доктор технических наук, PhD, ведущий научный сотрудник ОНИЛ-4; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений; Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк; arishenskiy_ev@sibsiu.ru
- В. Ю. Арышенский** доктор технических наук, главный научный сотрудник ОНИЛ-4; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; arysh54@mail.ru
- А. А. Рагазин** аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, инженер ОНИЛ-4; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aleksander_ragazin@samara-metallurg.ru
- Д. Ю. Распосиенко** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией цветных сплавов; Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург; gasposienko@imp.uran.ru
- Ф. В. Гречников** академик РАН, доктор технических наук, заведующий кафедрой обработки металлов давлением; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; gretch@ssau.ru
- В. В. Макаров** научный сотрудник; Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург; младший научный сотрудник ОНИЛ-4; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; makarov@imp.uran.ru
- С. В. Коновалов** доктор технических наук, главный научный сотрудник ОНИЛ-4; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; проректор по научной и инновационной деятельности; Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк; konovalov@sibsiu.ru

Изучено влияние режимов отжига холоднокатаной ленты из сплавов 1580 и 1590 на формирование в них зеренной структуры и механических свойств. Сплав 1590 отличается от 1580 наличием гафниевых, эрбиевых добавок. Образцы из этих сплавов получали литьем в стальной кокиль, после чего проводили их гомогенизацию при температуре 440°C в течение 4 часов. Затем образцы отправлялись на горячую прокатку при температуре 440°C, следом проводилась холодная прокатка до 2 мм, суммарный процент обжатия при которой был равен 66%. Холоднокатаную ленту отжигали в температурных интервалах от 330 до 440°C с выдержкой в 1 час. В гомогенизированном состоянии с помощью просвечивающей микроскопии исследовались размеры и морфология упрочняющих наночастиц Al_3Sc . В холоднокатаном и отожженном состоянии определялись механические свойства и зеренная структура. В ходе гомогенизирующего отжига в сплаве 1590 образуются более мелкодисперсные упрочняющие наночастицы, чем в сплаве 1580. Такие особенности микроструктуры можно объяснить наличием эрбия, способствующего формированию

дополнительных зародышей наночастиц типа Al_3Sc , и гафния, препятствующего их дальнейшему росту. В обоих сплавах после холодной прокатки и заключительных отжигов выявлена нерекристаллизованная структура. Механические свойства лучше у сплава 1590 вне зависимости от температуры отжига, что объясняется большим количеством и меньшими размерами упрочняющих наночастиц.

Алюминий; гафний; эрбий; горячая прокатка; микроструктура; интерметаллиды

Цитирование: Арышенский Е.В., Арышенский В.Ю., Рагазин А.А., Распосиенко Д.Ю., Гречников Ф.В., Макаров В.В., Коновалов С.В. Влияние добавок Hf и Er на формирование механических свойств и микроструктуры в сплавах системы AL-MG-SC-ZR // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 137-146. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-137-146

Введение

Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее широко используемых материалов в различных отраслях промышленности благодаря их легкости, прочности и хорошей коррозионной стойкости [1 – 3]. Добавление в алюминий магния ведет к существенному росту прочностных свойств [4], что делает сплавы системы Al-Mg очень востребованными в транспортной и аэрокосмической промышленности [5]. Дополнительного улучшения прочностных свойств можно добиться за счет введения малых скандиевых добавок. Скандий способствует измельчению литой структуры и формированию упрочняющих наноразмерных частиц типа Al_3Sc [6]. Дополнительно повысить эффективность скандиевого легирования можно добавками циркония, который повышает эффект измельчения зерна при литье, а также способствует термостабилизации наночастиц Al_3Sc [7]. Недавние исследования показали [5], что дополнительно повысить эффективность использования Sc можно также с помощью малых добавок Hf и Er. Первый, так же как и цирконий, термостабилизирует частицы Al_3Sc и повышает эффективность модификации литой структуры [9; 10]. Второй способствует образованию дополнительного количества частиц Al_3Sc , образуя ядро типа Al_3Er , вокруг которого формируется оболочка из скандия [11 – 13]. Недавно разработанный сплав высокомагнийевый 1590, содержащий кроме скандия цирконий, гафний и эрбий, уже показал высокие прочностные характеристики после гомогенизации. Однако не существует исследований его свойств в холоднокатаном и отожженном состоянии и обоснования их связи с упрочняющими наночастицами. Кроме того, не изучено влияние эрбия и гафния на количество и размер упрочняющих частиц в данном сплаве. Решение этих вопросов является основной целью настоящей работы.

Методика эксперимента

Для исследования были отлиты сплавы 1590 и 1580 (табл. 1). Основное отличие данных сплавов заключается в том, что 1590 кроме скандия и циркония также содержит эрбий и гафний. Таким образом, сравнение данных сплавов позволит оценить влияние малых добавок эрбия и гафния на микроструктуру и механические свойства. Элементный состав определялся спектральным методом на атомно-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Массовая доля элемента, %											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sc	Zr	Er	Hf
1590	0,04	0,07	0,01	0,41	5,57	0,01	0,22	0,01	0,141	0,102	0,109	0,051
1580	0,08	0,13	0,08	0,58	5,28	0,13	0,02	0,03	0,13	0,098	–	–

Экспериментальная плавка проводилась в среднечастотной индукционной печи с помощью графитового тигеля. Масса полученного расплава составила 4-5 кг, а масса литого слитка – 3 кг. В качестве шихты были следующие материалы: алюминий А85, первичный магний МГ90, цинк Ц1, лигатуры Al-Sc2, Al-Zr5, Al-Mn10, Al-Er5, Al-Hf2. Лигатуры вводили в температурном диапазоне 770-790°C, и смесь подвергали воздействию в течение 5 минут для лучшего усвоения. Присадка магния и цинка осуществлялась после охлаждения расплава до температуры 740°C. После присадки всех легирующих компонентов удаляли шлак с поверхности расплавленного металла и отбирали пробу для определения химического состава сплава. Перед заливкой расплава в стальной кокиль металл рафинировали карналлитовым флюсом для очистки расплавов от неметаллических и водородных включений. Флюс вводили из расчета 5 г на 1 кг шихты. После затвердевания слиток извлекали из кокиля и охлаждали в воде.

Далее слитки подвергали гомогенизационному отжигу в муфельной печи при температуре 440°C в течение 4 часов. Исследование дисперсоидов проводили методами просвечивающей электронной микроскопии на оборудовании центра коллективного пользования «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» с помощью микроскопа высокого разрешения Tecnai G2 30 Twin, оснащённом системой энергодисперсионного рентгеноанализа EDAX, при ускоряющем напряжении 300 кВ с использованием стандартных методик: светлопольных, темнопольных изображений и электронной микродифракции.

Прокатка слитков производилась на реверсивном прокатном стане. Сначала слитки прокатывали горячим способом при температуре 440°C, потом холодным с суммарным обжатием 66%, затем отжигали в температурных интервалах от 330°C до 440°C с выдержкой в 1 час. После этого для всех режимов отжига, а также после холодной прокатки изучались зеренная структура и механические свойства. Зеренная структура исследовалась с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert- 40 MAT. Механические свойства исследуемых алюминиевых сплавов определялись испытаниями на одноосное растяжение при комнатной температуре в соответствии с ISO 6892-1.

Результаты и обсуждение

β -фаза является важным фактором, влияющим на пластичность сплавов с высоким содержанием магния. Её выделения на границах зёрен значительно снижают пластичность данного типа материалов. Обычно чем больше магния, тем больше содержание β -фазы. На рис. 1 показано содержание β -фазы в сплавах с высоким содержанием магния в литом состоянии в зависимости от термической обработки.

После гомогенизационного отжига при температуре 440°C в течение 4 часов в сплаве 1590 наблюдается формирование равноосных наночастиц $Al_3(Sc, Zr)$ диаметром до 15-20 нм, также при данной температуре отжига происходит выделение Al_6Mn в виде пластин длиной до 150 нм (рис. 1). Частицы Al_6Mn характеризуются неравномерным распределением в объёме образца, что, по-видимому, связано преимущественно гетерогенным выделением фазы по дислокациям и малоугловым границам.

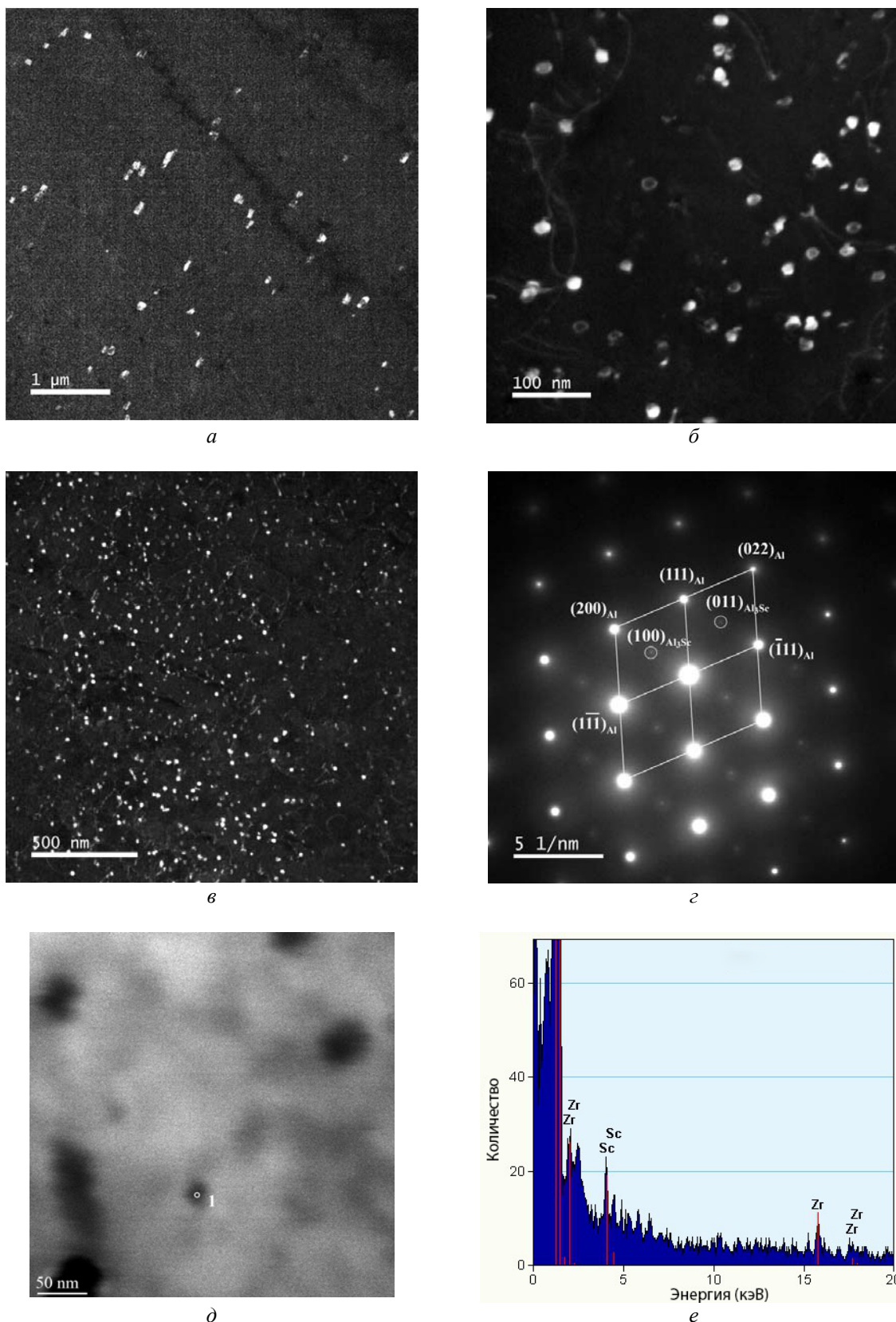


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры образца сплава 1590 после отжига 440°C, 4 ч:

а – светлопольное изображение; б, в – темнопольные изображения в рефлексах; г – микроэлектроннограмма; д – светлопольное изображение в режиме сканирования на просвет (STEM); е – спектр характеристического излучения в точке 1 на рисунке д

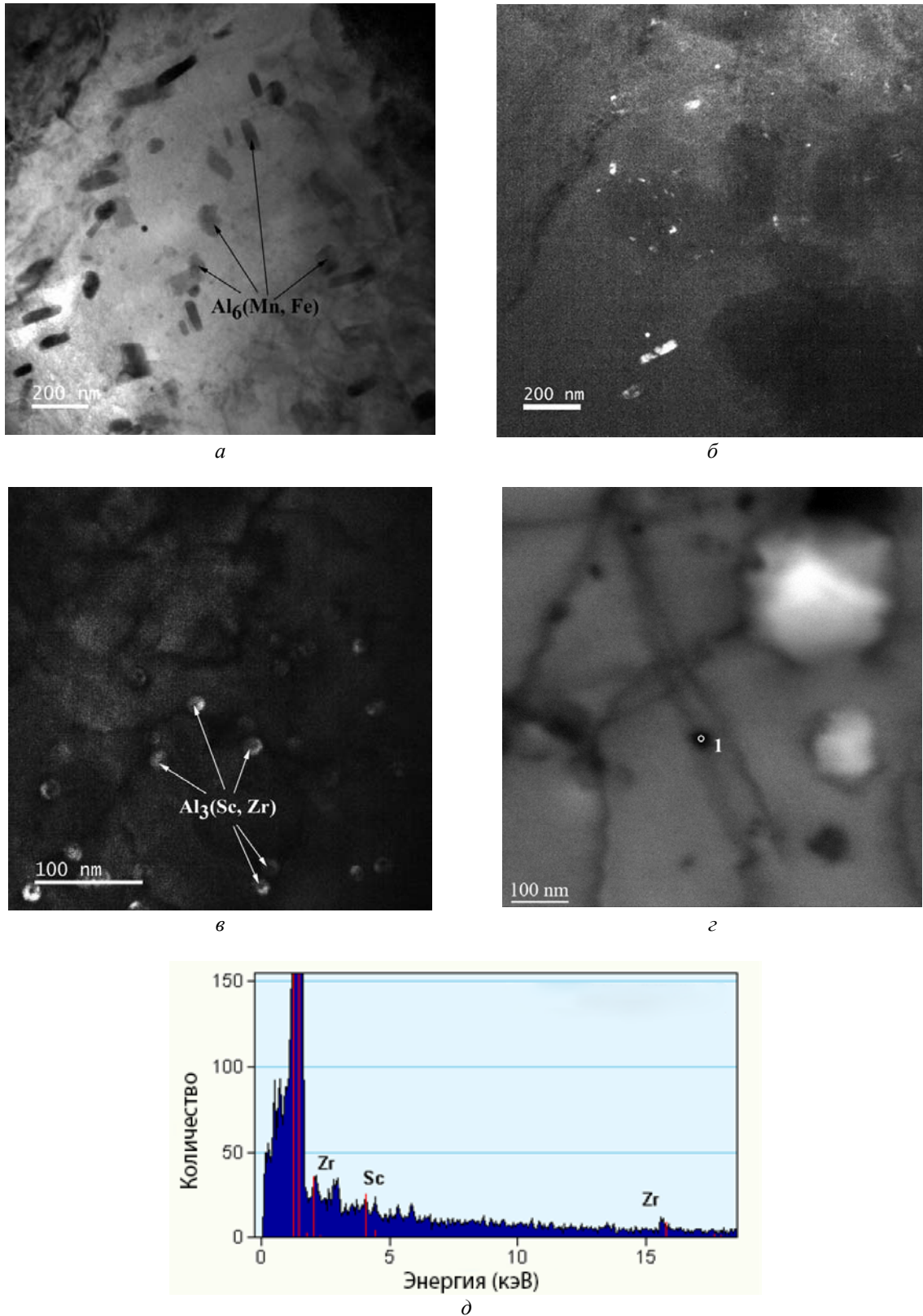


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры образца сплава 1580 – 440°C, 4 часа: а – светлопольное изображение; б, в – темнопольные изображения в рефлексах; г – светлопольное изображение в режиме сканирования на просвет (STEM); д – спектр характеристического излучения в точке 1 на рисунке г

После термической обработки при температуре 440°C в течение 4 часов, в сплаве 1580 так же как и в сплаве 1590, выявлены частицы $Al_3(Sc, Zr)$, которые характеризуются равноосной формой и средним диаметром до 30 нм, что в 1,5 раза больше, чем в сплаве 1590 (рис. 2). Так же как и в сплаве 1590, на изображениях микроструктуры наблюдаются частицы Al_6Mn длиной 100-150 нм и шириной до 40 нм.

Хотя гафний и эрбий не были напрямую обнаружены в дисперсоидах, об их наличии можно судить по косвенным признакам. Во-первых, по большому количеству частиц в сплаве 1590 по сравнению со сплавом 1580, что может быть следствием образования большего количества зародышей вследствие легирования эрбием. Кроме того, размеры нанодисперсных частиц в сплаве 1590 меньше, чем в сплаве 1580. Это может быть объяснено влиянием гафния, создающего термостабилизирующую оболочку, замедляющую рост данных частиц [10]. То, что эрбий и гафний не обнаружены непосредственно в результате EDS-анализа наночастиц, может объясняться малыми размерами самих частиц, а также тем, что характеристический спектр эрбия и гафния близок к другим переходным элементам и может сливаться с ними. Для обнаружения данных элементов и исследования их распределения внутри частиц следует применять более точные методы, например атомную томографию.

На рис. 3 представлена микроструктура холоднокатаных образцов и после термической обработки 440°C – 1 час.

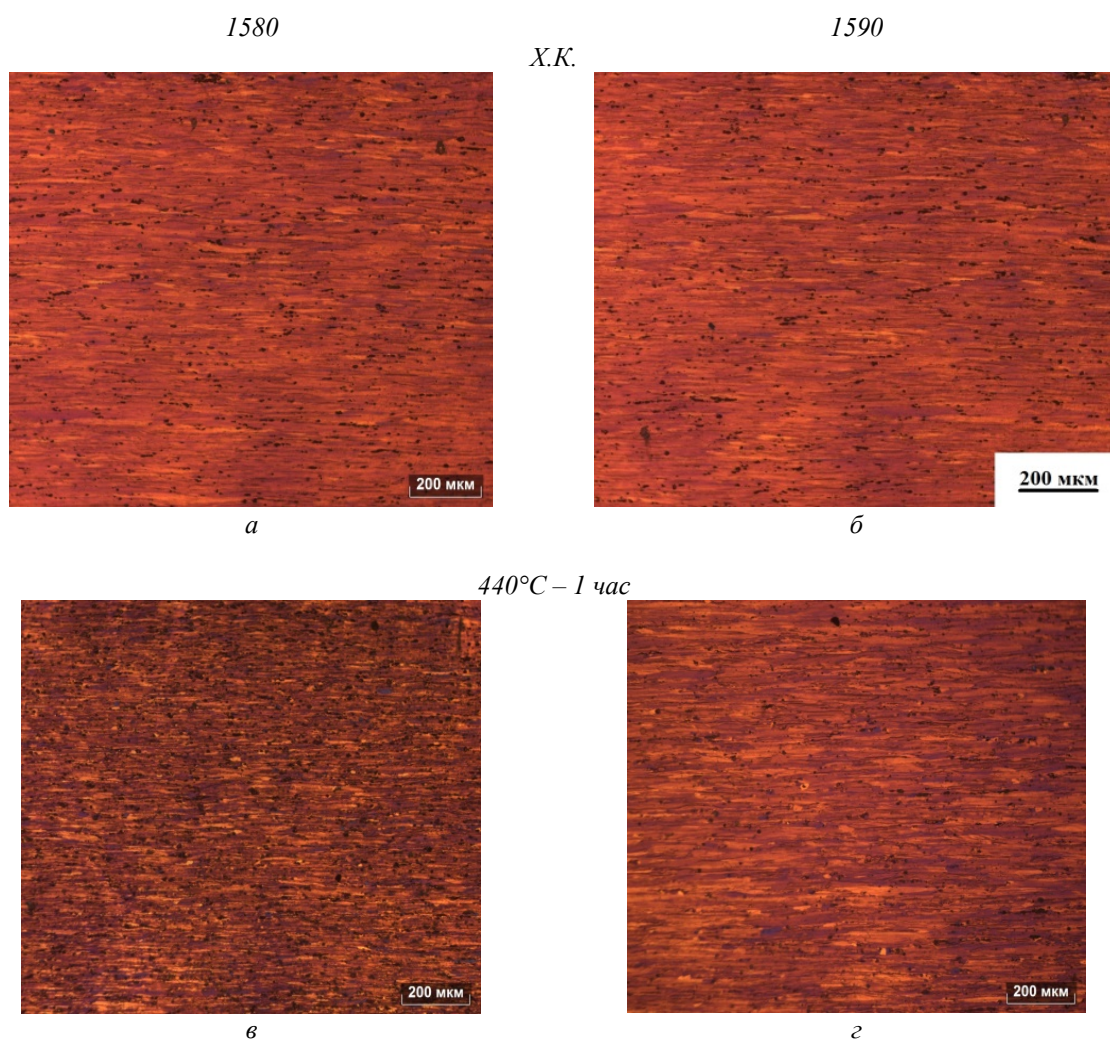


Рис. 3. Микроструктура полос сплавов в холоднокатаном состоянии (а – 1580, б – 1590) и после отжига 440°C – 1 час (в – 1580, з – 1590)

В обоих сплавах во всех исследуемых состояниях наблюдается нерекристаллизованная структура (рис. 4). Это в первую очередь объясняется действием частиц Al_3Sc , которые, как известно, эффективно блокируют рекристаллизацию в алюминиевых сплавах [14]. Сохранение нерекристаллизованной структуры в сплавах 1590 и 1580 подтверждает высокую термостабильность нанодисперстных интерметаллидов в обоих сплавах.

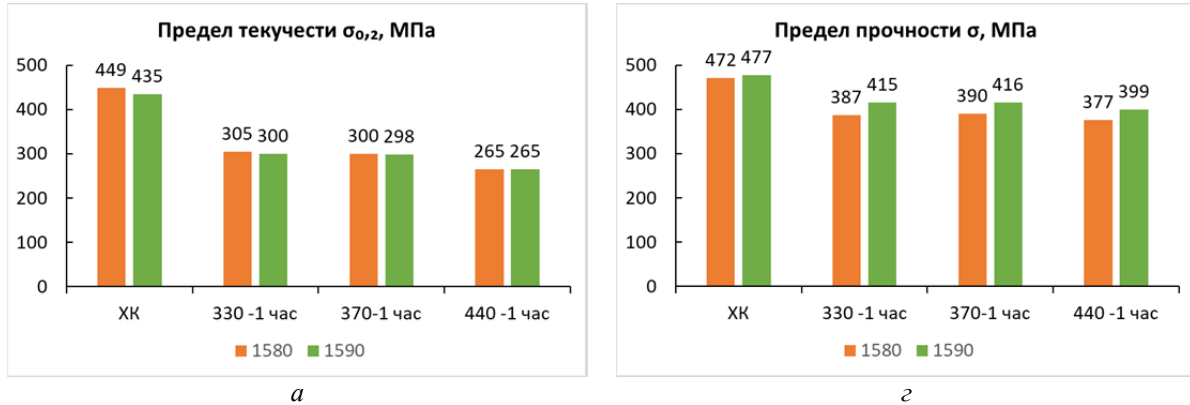


Рис. 4. Механические свойства:

а – предел текучести $\sigma_{0,2}$; б – предел прочности σ в холоднокатаном состоянии и после отжига в интервале температуры 330...370°C

В холоднокатаном состоянии в сплавах 1580 и 1590 наблюдаются максимальные значения предела прочности: 477 МПа (сплав 1590) и 472 МПа (сплав 1580) и предела текучести: 435 МПа (сплав 1590) и 449 МПа (сплав 1580). Схожесть в значениях прочностных свойств в холоднокатаном состоянии объясняется высокой степенью нагартовки (отметим, что относительное удлинение для обоих сплавов невелико и не превышает 3%). Поэтому упрочнение (при данных размерах частиц) основано на механизме Орована [16] и практически не успевае реализовать, т. к. образец быстро разрушается. При более высоких температурах отжига наблюдается преимущество сплава 1590 над сплавом 1580, заключающееся в более высоком пределе прочности. Основное объяснение наблюдаемой картины – большая дисперсность и меньший размер частиц в сплаве 1590.

Выводы

Представленные исследования показали, что после проведения гомогенизации в сплавах марок 1580 и 1590 выявлены упрочняющие наночастицы Al_3Sc . Установлено, что в сплаве 1590 плотность распределения частиц $Al_3(ScZr)$ выше, а размер частиц в 1,5 раза меньше, чем у сплава 1580. Увеличение количества частиц можно объяснить добавками эрбия, а сохранение их высокой дисперсности действием гафния. Кроме того, в обоих сплавах выявлены частицы в виде пластин Al_6Mn одинакового размера.

В обоих сплавах при всех режимах обработки наблюдаются нерекристаллизованные структуры, что говорит о термической стабильности наночастиц $Al_3(ScZr)$. В холоднокатаном состоянии у сплавов наблюдаются практически одинаковые прочностные свойства. В отожжённом состоянии предел прочности у сплава 1590 выше, чем у сплава 1580 при всех режимах его термической обработки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

Библиографический список

1. Du H., Zhang S., Zhang B., Tao X., Yao Z., Belov N., van der Zwaag S., Liu Z. Ca-modified Al-Mg-Sc alloy with high strength at elevated temperatures due to a hierarchical microstructure // *Journal of Materials Science*. 2021. V. 56. P. 16145-16157. DOI: 10.1007/s10853-021-06310-5
2. Savchenkov S., Kosov Ya., Bazhin V., Krylov K., Kawalla R. Microstructural master alloys features of aluminum-erbium system // *Crystals*. 2021. V. 11, Iss. 11. DOI: 10.3390/cryst11111353
3. Зорин И.А., Дриц А.М., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Гречников Ф.В., Комаров В.С. Влияние переходных металлов на микроструктурную композицию алюминиевых сплавов в литом состоянии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 4. С. 520-531. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011
4. Blankenship C.P., Starke E.A., Hornbogen E. Microstructure and properties of aluminum alloys // *Microstructure and Properties of Materials*. P. 1-49. DOI: 10.1142/9789814261326_0001
5. Арышенский Е.В., Арышенский В.Ю., Дриц А.М., Гречников Ф.В., Рагазин А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов 1570, 1580 и 1590 // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2022. Т. 21, № 4. С. 76-87. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-76-87
6. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 7. С. 7-15.
7. Захаров В.В. О совместном легировании алюминиевых сплавов скандием и цирконием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 6 (708). С. 3-8.
8. Соседков С.М., Дриц А.М., Арышенский В.Ю., Яшин В.В. Деформационное упрочнение плит из сплавов 1565ч, АМг6, 01570 и 1580 при холодной прокатке // *Технология лёгких сплавов*. 2020. № 1. С. 39-43.
9. Hallem H., Forbord B., Marthinsen K. Investigation of Al-Fe-Si alloys with additions of Hf, Sc and Zr // *Materials Forum*. 2004. V. 28. P. 825-831.
10. Hallem H., Lefebvre W., Forbord B., Danoix F., Marthinsen K. The formation of Al₃(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})-dispersoids in aluminium alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. V. 421, Iss. 1-2. P. 154-160. DOI: 10.1016/j.msea.2005.11.063
11. Booth-Morrison C., Dunand D.C., Seidman D.N. Coarsening resistance at 400°C of precipitation-strengthened Al-Zr-Sc-Er alloys // *Acta Materialia*. 2011. V. 59, Iss. 18. P. 7029-7042. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.07.057
12. Karnesky R.A., Dunand D.C., Seidman D.N. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er // *Acta Materialia*. 2009. V. 57, Iss. 14. P. 4022-4031. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.04.034
13. Liu X., Wang Q., Zhao C., Li H., Wang M., Chen D., Wang H. Formation of ordered precipitates in Al-Sc-Er-(Si/Zr) alloy from first-principles study // *Journal of Rare Earths*. 2021. V. 39, Iss. 5. P. 609-620. DOI: 10.1016/j.jre.2020.08.005
14. Röyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys // *International Materials Reviews*. 2005. V. 50, Iss. 1. P. 19-44. DOI: 10.1179/174328005X14311
15. Kendig K.L., Miracle D.B. Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy // *Acta Materialia*. 2002. V. 50, Iss. 16. P. 4165-4175. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00258-6
16. Chen H., Chen Z., Ji G., Zhong S., Wang H., Borbély A., Ke Y., Bréchet Y. Experimental and modelling assessment of ductility in a precipitation hardening AlMgScZr alloy // *International Journal of Plasticity*. 2021. V. 139. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102971

EFFECT OF HF AND ER ADDITIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF AL-MG-SC-ZR SYSTEM ALLOYS

© 2024

- E. V. Aryshenskii** Doctor of Science (Engineering), PhD, Leading Researcher of ONIL-4; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; Senior Researcher at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing; Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation; arishenskiy_ev@sibsiu.ru
- V. Yu. Aryshenskii** Doctor of Science (Engineering), Chief Researcher of ONIL-4; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; arysh54@mail.ru
- A. A. Ragazin** Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials, Engineer of ONIL-4; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aleksander.ragazin@samara-metallurg.ru
- D. Yu. Rasposienko** Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Non-ferrous Alloys; M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; rasposienko@imp.uran.ru
- F. V. Grechnikov** Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Metal Forming; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; gretch@ssau.ru
- V. V. Makarov** Research Associate; M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, Junior Researcher of ONIL-4; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; makarov@imp.uran.ru
- S. V. Konovalov** Doctor of Science (Engineering), Chief Researcher of ONIL-4; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities; Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation; konovalov@sibsiu.ru

The study addresses the effect of 1580 and 1590 alloys cold rolled strip annealing practices on the alloys' grain structure and mechanical properties. The 1590 alloy differs from the 1580 alloy by hafnium and erbium additions. Samples of such alloys were produced by casting into a steel mold. After that they were homogenized during 4 h at 440°C. Then the samples were hot rolled at 440°C, with further cold rolling to 2 mm, with the cumulative percentage reduction equal to 66%. The cold rolled strip was annealed at the temperature ranging from 330 to 440°C with 1 h soaking. The sizes and morphology of Al₃Sc strengthening nanoparticles were examined in homogenized condition using transmission microscopy. The mechanical properties and grain structure were defined in cold rolled and annealed conditions. During homogenizing annealing in the 1590 alloy finer strengthening nanoparticles are formed compared to the 1580 alloy. Such features of the microstructure can be explained by the presence of erbium, promoting formation of additional Al₃Sc-type nanoparticles nuclei, and hafnium, preventing their further growth. Non-recrystallized structure was identified in both alloys after cold rolling and final annealing. The 1590 alloy has better mechanical properties, regardless of the annealing temperature, which is explained by a larger portion and smaller size of strengthening nanoparticles.

Aluminum; hafnium; erbium; hot rolling; microstructure; intermetallic compounds

Citation: Aryshenskii E.V., Aryshenskii V.Yu., Ragazin A.A., Rasposienko D.Yu., Grechnikov F.V., Makarov V.V., Konovalov S.V. Effect of HF and ER additions on the mechanical properties and microstructure of AL-MG-SC-ZR system alloys. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 137-146. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-137-146

References

1. Du H., Zhang S., Zhang B., Tao X., Yao Z., Belov N., van der Zwaag S., Liu Z. Ca-modified Al-Mg-Sc alloy with high strength at elevated temperatures due to a hierarchical microstructure. *Journal of Materials Science*. 2021. V. 56. P. 16145-16157. DOI: 10.1007/s10853-021-06310-5
2. Savchenkov S., Kosov Ya., Bazhin V., Krylov K., Kawalla R. Microstructural master alloys features of aluminum-erbium system. *Crystals*. 2021. V. 11, Iss. 11. DOI: 10.3390/cryst11111353
3. Zorin I.A., Drita A.M., Aryshenskii E.V., Kononov S.V., Grechnikov F.V., Komarov V.S. Effect of transition metals on as-cast aluminum alloys microstructure composition. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*. 2022. V. 19, no. 4. P. 520-531. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011
4. Blankenship C.P., Starke E.A., Hornbogen E. Microstructure and properties of aluminum alloys. *Microstructure and Properties of Materials*. P. 1-49. DOI: 10.1142/9789814261326_0001
5. Aryshensky E.V., Aryshensky V.Yu., Drita A.M., Grechnikov F.V., Ragazin A.A. Thermal treatment effect on the mechanical properties of 1570, 1580 and 1590 aluminum alloys. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 4. P. 76-87. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-76-87
6. Zakharov V.V. Effect of scandium on the structure and properties of aluminum alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003. V. 45, Iss. 7-8. P. 246-253. DOI: 10.1023/A:1027368032062
7. Zakharov V.V. Combined alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. V. 56, Iss. 5-6. P. 281-286. DOI: 10.1007/s11041-014-9746-5
8. Sosedkov S.M., Drita A.M., Aryshensky V.Yu., Yashin V.V. Strain hardening of 1565ch, AMg6, 01570 and 1580 alloy plates upon the cold rolling. *Tekhnologiya Legkikh Splavov*. 2020. No. 1. P. 39-43. (In Russ.)
9. Hallem H., Forbord B., Marthinsen K. Investigation of Al-Fe-Si alloys with additions of Hf, Sc and Zr. *Materials Forum*. 2004. V. 28. P. 825-831.
10. Hallem H., Lefebvre W., Forbord B., Danoix F., Marthinsen K. The formation of Al₃(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})-dispersoids in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2006. V. 421, Iss. 1-2. P. 154-160. DOI: 10.1016/j.msea.2005.11.063
11. Booth-Morrison C., Dunand D.C., Seidman D.N. Coarsening resistance at 400°C of precipitation-strengthened Al-Zr-Sc-Er alloys. *Acta Materialia*. 2011. V. 59, Iss. 18. P. 7029-7042. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.07.057
12. Karnesky R.A., Dunand D.C., Seidman D.N. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er. *Acta Materialia*. 2009. V. 57, Iss. 14. P. 4022-4031. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.04.034
13. Liu X., Wang Q., Zhao C., Li H., Wang M., Chen D., Wang H. Formation of ordered precipitates in Al-Sc-Er-(Si/Zr) alloy from first-principles study. *Journal of Rare Earths*. 2021. V. 39, Iss. 5. P. 609-620. DOI: 10.1016/j.jre.2020.08.005
14. Röyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2005. V. 50, Iss. 1. P. 19-44. DOI: 10.1179/174328005X14311
15. Kendig K.L., Miracle D.B. Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy. *Acta Materialia*. 2002. V. 50, Iss. 16. P. 4165-4175. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00258-6
16. Chen H., Chen Z., Ji G., Zhong S., Wang H., Borbély A., Ke Y., Bréchet Y. Experimental and modelling assessment of ductility in a precipitation hardening AlMgScZr alloy. *International Journal of Plasticity*. 2021. V. 139. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.102971