



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 549:54.055

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.025



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ER И HF НА ЛИТУЮ МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1590, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Александр Алексеевич Рагазин ¹, Евгений Владимирович Арышенский ²,
Владимир Юрьевич Арышенский ³, Александр Михайлович Дриц ⁴,
Сергей Валерьевич Коновалов ⁵

^{1,3,4,5} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

^{2,5} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ aleksander.ragazin@samara-metallurg.ru, 0000-0002-6762-7436

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ arysh54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6869-4764>

⁴ dritsam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>

⁵ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния эрбия и гафния на литую микроструктуру высокомагниевого сплава 1590 с экономным скандиевым легированием. В качестве эксперимента были отобраны 9 вариантов слитков, которые содержали гафний и эрбий. Установлено, что в сплаве 1591 без добавок гафния и эрбия образуется дендритная структура с размером зерна ≈ 373 мкм. При добавлении в сплав 1590 гафния и эрбия зерно начинает измельчаться. При содержании Hf и Er в количестве 0,16 (% вес) в 1590 образуется мелкозернистая недендритная структура с размерами зерен 32–38 мкм. Кроме того, добавление данных элементов приводит к росту количества и размеров интерметаллидов Al₃Sc, которые, в свою очередь, вызывают модификацию литой структуры. Основное объяснение этому заключается в том, что Er и Hf так же, как цирконий, уменьшают концентрацию скандия, необходимую для формирования первичных интерметаллидов типа Al₃Sc. В то же время измельчение зерна не приводит к росту прочностных свойств и снижает пластические, это происходит из-за большого количества упомянутых выше интерметаллидов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микроструктура, гафний, эрбий, скандий, интерметаллиды, кристаллизация, механические свойства.

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

Для цитирования: Изучение влияния добавок Er и Hf на литую микроструктуру и механические свойства высокомагниевого алюминиевого сплава 1590, экономно легированного скандием / А. А. Рагазин [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 199–207. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.025. EDN: <https://elibrary.ru/VBINRL>.

Original article

STUDY OF ER AND HF ADDITIONS EFFECT ON AS-CAST MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 1590 MAGNESIUM-RICH ALUMINUM ALLOY WITH LEAN SCANDIUM ADDITION

Alexander A. Ragazin ¹, Evgenii V. Aryshenskii ², Vladimir Yu. Aryshenskii ³,
Alexander M. Drits ⁴, Sergei V. Konovalov ⁵

© Рагазин А. А., Арышенский Е. В., Арышенский В. Ю., Дриц А. М., Коновалов С. В., 2023

^{1, 3, 4, 5} Samara National Research University, Samara, Russia

^{2, 5} Siberian State Industrial University, Novokuzneck, Russia

¹ aleksander.ragazin@samara-metallurg.ru, 0000-0002-6762-7436

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ arysh54@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6869-4764>

⁴ dritsam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>

⁵ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Abstract. *The study addresses the effect of erbium and hafnium on as-cast microstructure of 1590 magnesium-rich alloy with lean scandium addition. 9 ingots modifications with different hafnium and erbium contents have been cast in a steel mold for the study purposes. It is established, that dendritic structure with $\approx 373 \mu\text{m}$ grain size forms in 1591 alloy without hafnium and erbium additions. 1590 alloy grain refinement starts upon hafnium and erbium addition. At 0.16 (% weight) Hf and Er content fine grain (with $32\text{--}38 \mu\text{m}$ grain size) non-dendritic structure forms in 1590 alloy. Besides, such elements addition causes Al_3Sc intermetallic compound amount and size increase, thus leading to as-cast structure modification. This is mainly explained by the capability of Er and Hf, similarly to zirconium, to reduce concentration of scandium, required for Al_3Sc -type primary intermetallic compounds forming. At the same time grain refinement does not lead to strength improvement and deteriorates plastic properties due to large amount of the above intermetallic compounds.*

Keywords: aluminum alloys, microstructure, hafnium, erbium, scandium, intermetallic compounds, crystallization, mechanical properties.

Acknowledgements: *The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>.*

For citation: Ragazin, A. A., Aryshenskii, E. V., Aryshenskii, V. Yu., Dritz, A. M. & Konovalov, S. V. (2023). Study of Er and Hf additions effect on as-cast microstructure and mechanical properties of 1590 magnesium-rich aluminum alloy with lean scandium addition. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 199-207. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.025. EDN: <https://elibrary.ru/VBINRL>.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы являются неотъемлемой частью современной промышленности, где требуется низкий вес, приемлемые прочностные свойства и высокая коррозионная стойкость [1, 2, 3]. Сплавы системы Al–Mg являются одними из самых востребованных современной промышленностью алюминиевых сплавов [4]. Добавки магния ведут к твердорастворному упрочнению, тем самым положительно влияя на механические свойства [5, 6]. Повысить прочностные характеристики алюминиевых сплавов возможно за счет легирования малых добавок Sc, которые улучшают прочность. За счет его введения значительно модифицируется литая структура, а кроме того, происходит выпадение из пересыщенного твердого раствора упрочняющей фазы Al_3Sc [7]. Стоит отметить, что измельчение зерна, в том числе и в литой структуре, в целом положительно влияет на механические свойства [8].

Другие переходные элементы, такие как цирконий, гафний и эрбий, также являются хорошими модификаторами литой структуры алюминиевых сплавов [9–11]. При совместном добавлении скандия с цирконием значительно увеличивается эффективность дробления литой структуры [12]. Как показали дальнейшие исследования, основная причина заключается в том, что их совместное ле-

гирование снижает концентрацию этих переходных элементов, необходимых для появления в жидкости первичных интерметаллидов [13, 14]. Гафний и эрбий имеют ряд схожих свойств со скандием и цирконием. Например, их алюминиды имеют высокий уровень кристаллографического соответствия с алюминиевой матрицей. Возможно, что совместное использование Hf и Er будет усиливать способности друг друга к модификации, в том числе и у скандия и циркония. Однако данный вопрос не исследован в литературе, в том числе и для алюминиевых сплавов системы Al–Mg. Таким образом, целью данного исследования является изучение влияния совместных Sc, Zr, Hf, Er добавок на измельчение литой структуры в алюминиевых сплавах с высоким содержанием магния.

МЕТОДЫ

Для исследования был выбран сплав 1590, содержащий Sc, Zr, Er и Hf. Для изучения влияния содержания элементов в литой структуре 1590 использовалась таблица № 1. За основу была выбрана модификация 1590, не содержащая скандия (далее 1591). Масса отливаемого слитка составляла 3 кг. В процессе исследования к базовому сплаву были добавлены эрбий в количестве 0,03–0,16 % вес. и гафний в количестве 0,05–0,16% вес. для изучения зеренной структуры отливки.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ER И HF НА ЛИТУЮ МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1590, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Опытные плавки проводились на индукционной печи средней частоты емкостью 10 кг.

В качестве шихтовых материалов для приготовления опытных сплавов использовались следующие шихтовые материалы: первичный алюминий марки А85, магний первичный марки МГ90, цинк марки Ц1, лигатура марок Al-Mn10, Al-Zr5, Al-Sc2, Al-Er5, Al-Hf2.

Все шихтовые материалы перед загрузкой в печь взвешивались на электронных весах МЕХЭЛЕКТРОН-М ВР4900 до 15 кг с погрешностью 5 г и на электронных весах МИДЛЕНА 251 до 500 г с погрешностью 0,1 г.

Загрузка шихтовых материалов в печь производилась вручную. В первую очередь производилась загрузка первичного алюминия и его плавление. После плавления первичного алюминиевого сплава при температуре 730 °С с поверхности расплава удалялся

шлак. Далее расплав нагревался до температуры 770–790 °С и производилась присадка лигатур Al-Sc2, Al-Hf-2, AlZr5, Al-Mn10 порциями по 300 г с последующим перемешиванием и выдержкой расплава в течение 5 мин. После присадки всей рассчитанной лигатуры расплав охлаждался до температуры 740 °С, и производилась присадка легирующих компонентов (Mg, Zn) по расчету. Далее производилось перемешивание расплава в течение 3-х минут с последующим нагревом расплава до температуры 740 °С и осуществлялся отбор пробы на экспресс-анализ химического состава плавки. Результаты химического состава всех опытных плавков представлены в таблице 1.

Литье слитков производилось в стальной со скоростью кристаллизации 10 °С/сек.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сплавов

Table 1 – Chemical composition of the studied alloys

Сплав	Массовая доля элементов, %								
	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Zr	Sc	Er*	Hf*
№ 1	0,04	0,07	0,4	5,5	0,22	0,1	0,14	0,1	0,05
№ 2	0,03	0,06	0,42	5,54	0,2	0,1	0,14	–	–
№ 3	0,04	0,07	0,41	5,54	0,2	0,1	0,14	0,03	0,05
№ 4	0,04	0,07	0,41	5,58	0,2	0,1	0,14	0,03	0,1
№ 5	0,05	0,08	0,41	5,58	0,2	0,1	0,14	0,03	0,16
№ 6	0,04	0,07	0,41	5,57	0,2	0,1	0,14	0,1	0,05
№ 7	0,05	0,08	0,41	5,53	0,2	0,1	0,14	0,1	0,1
№ 8	0,05	0,08	0,41	5,57	0,2	0,1	0,14	0,1	0,16
№ 9	0,04	0,07	0,41	5,55	0,2	0,1	0,14	0,16	0,05
№ 10	0,05	0,08	0,42	5,56	0,2	0,1	0,14	0,16	0,1
№ 11	0,05	0,09	0,41	5,58	0,2	0,1	0,14	0,16	0,16

* – Указанное в таблице содержание Er, Hf согласно расчету.

Микроструктура выявлялась следующим образом: обработка поверхности на токарном станке, далее механическое полирование на автоматическом шлифовально-полировальном станке с последующим выявлением зерна. Электрополирование в фтороборном электролите состава: борная кислота – 11 г, фтористоводородная кислота – 30 мл, вода дистиллированная – 220 мл. Через электролит пропускают постоянный ток. Температура электролита – 20 °С, напряжение 30 В, время: 10–60 секунд. Время электрополирования выбирается по степени полируемости. При необходимости проводят повторное полирование. Зеренную структуру образцов исследовали на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert-40 MAT. Для каждого образца методом секущих ГОСТ 21073.2 измеряли средний размер зерна. Исследование интерметаллидных и дисперсоидных частиц проводи-

лось на сканирующем растровом микроскопе FEI Quanta Inspect S.

Для исследования химического состава интерметаллидных частиц состава проводилась полировка образцов с высокой чистотой. После полировки образцы исследовали на отражение на электронном микроскопе FEI Quanta Inspect S, с увеличением в 300 (интерметаллиды) и 10000 (мелкодисперсные интерметаллиды) раз.

Образцы фотографировали с помощью растрового электронного микроскопа на датчике упруго-отражённых электронов BSE, далее картинку переносились в программу Image Score. С помощью этой программы изображение еще раз обрабатывалось до нужного контраста подложки и фаз, чтобы программа смогла их отличить по контрасту. После проделанных операций программа Image J подсчитывала количество фаз в процентах относительно подложки. Для каждого

случая приводилось 10 съемок для набора статистики, необходимого для более точного определения размеров и распределения частиц второй фазы. Расчет фаз происходил с разным увеличением, что позволило исследо-

вать как крупные интерметаллидные частицы, так и мелкодисперсные интерметаллидные частицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зеренная структура

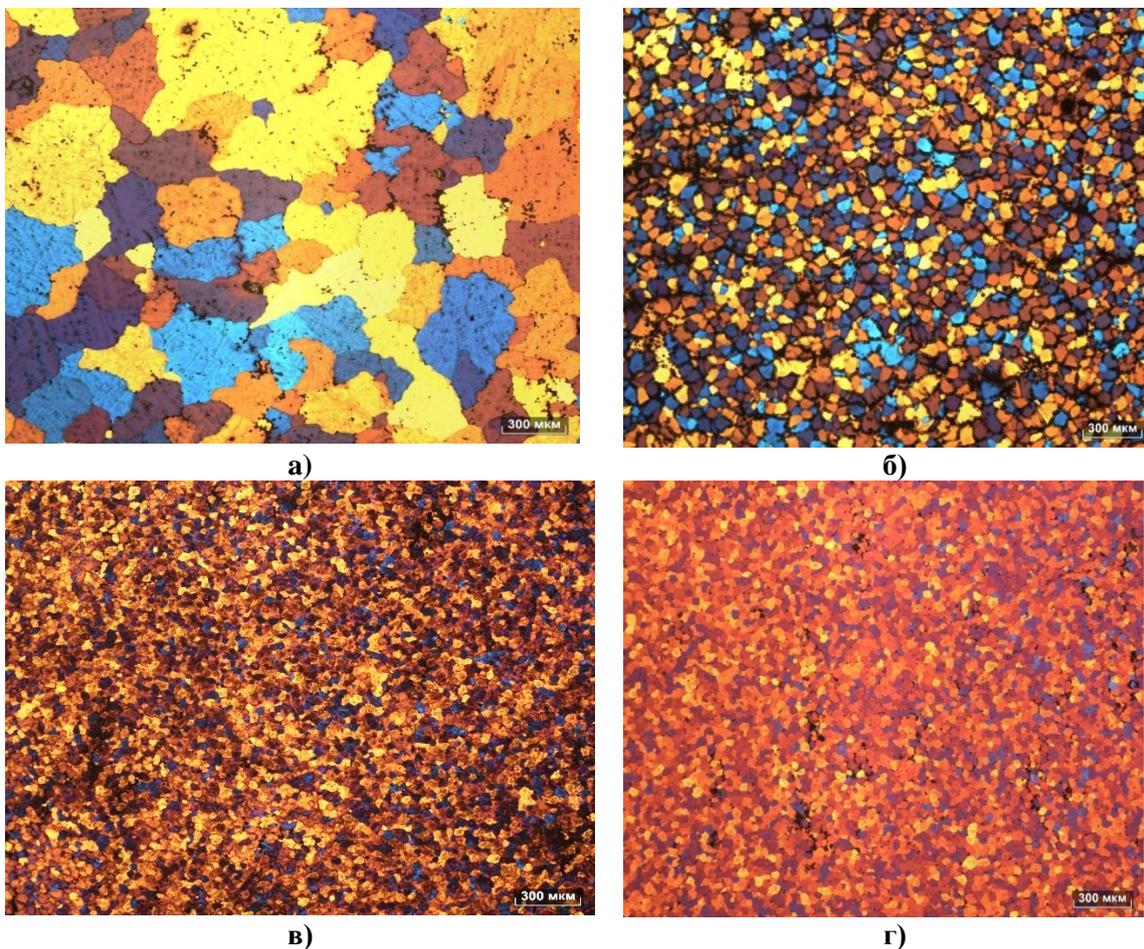


Рисунок 1 – Микроструктура исследуемых образцов из сплавов а) №1, б) №3; в) №5; г) №9
Figure 1 – Microstructure of the investigated samples from alloys а) №1, б) №3; в) №5; г) №9

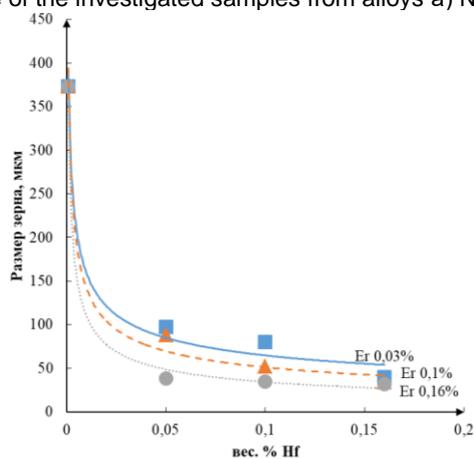


Рисунок 2 – Зависимость размера зерна от количества легирующих компонентов на образцах, отлитых в стальной кокиль

Figure 2 – The dependence of the grain size on the amount of alloying components on the samples cast in steel coquille.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ER И HF НА ЛИТУЮ МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1590, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

На образце без легирования гафнием и эрбием выявлена дендритная структура с размером зерна 373 мкм. При легировании сплава 1591 эрбием 0,03 % и гафнием 0,05 % происходит модифицирование литой структуры с 373 мкм до 97 мкм. С увеличением содержания гафния в сплаве до 0,1 % и 0,16 % и содержания эрбия 0,03 % средний размер зерна уменьшается до 52 мкм и 32 мкм соответственно. При содержании гафния 0,05 % и эрбия 0,1 % и 0,16 % средний размер зерна равен 80 мкм и 35 мкм соответственно. При содержании гафния и эрбия 0,1 %, и 0,16 % средний размер зерна становится равен 88 мкм и 35 мкм соответственно. Таким образом, можно сделать выводы, что с добавле-

нием гафния и эрбия происходит модифицирование литой структуры от 3 до 10 раз. При этом самая мелкозернистая структура наблюдается в сплавах № 5, № 9, № 11.

На рисунке 1 приведена зависимость размера зерна от общего количества элементов. Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод, что гафний и эрбий являются эффективными модификаторами. С помощью регрессионного анализа получена аналитическая запись зависимости размеров зерна (D , мкм) относительно количества исследуемых РЗМ в сплаве по формуле:

$$D = 2,782 * (\text{вес. \% Hf})^{-0,2317} * (\text{вес. \% Er})^{-0,2285}$$

Интерметаллидные частицы

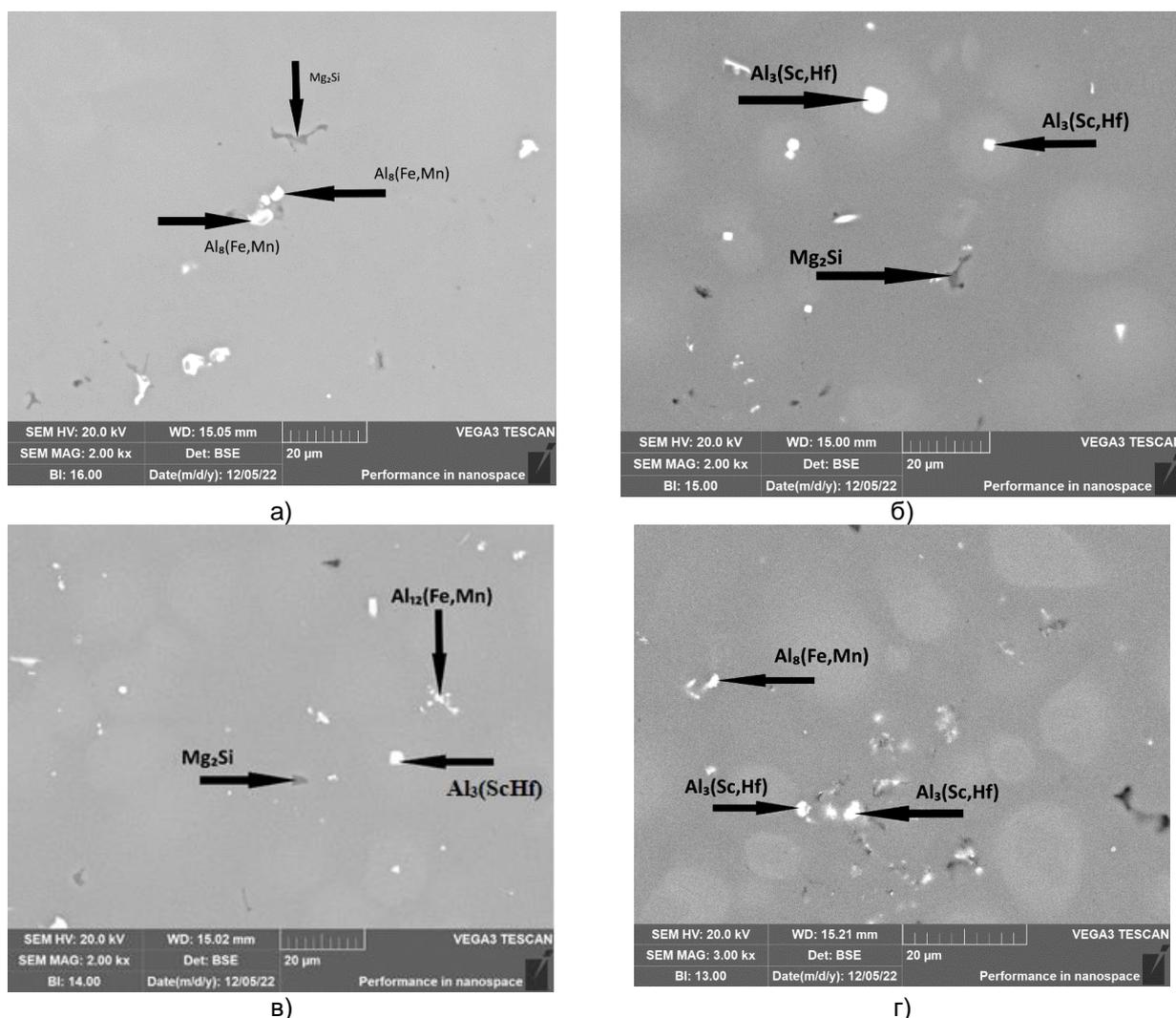


Рисунок 3 – Химический состав крупных интерметаллидных частиц в образцах, отлитых в стальной кокиль а) № 3; б) № 5; в) № 9; г) № 11

Figure 3 – Chemical composition of large intermetallic particles in samples cast in steel coquille а) №3; б) №5; в) №9; г) №11

Таблица 2 – Химический состав крупных интерметаллидных частиц, ат. %

Table 2 – Chemical composition of large intermetallic particles, at. %

Интерметаллидные частицы	Хим. состав						
	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Sc	Hf
Al ₈ (Fe,Mn)	78.04	–	8.9	5.6	–	–	–
Al ₁₂ (Fe,Mn)	85.28	–	7.47	6.12	–	–	–
Mg ₂ Si	66.37	22.61	–	–	10.05	–	–
Al ₃ (Sc,Hf)	71.06	–	–	–	–	11.85	8.94

В ходе исследования было выявлено отсутствие гафния и эрбия в составе сплава, содержащего первичные интерметаллиды. В тоже время наблюдаются типичные для данной группы алюминиевых сплавов интерметаллиды, которые можно отнести к Mg₂Si и Al₆(FeMn) [15] (здесь и далее химический состав интерметаллидов см. в таблице № 2). Отсутствие первичных, содержащих скандий, интерметаллидов приводит к тому, что измельчение зеренной структуры не происходит. С увеличением содержания гафния и эрбия выявлены интерметаллиды, которые, основываясь на их морфологии и химическом составе, можно отнести к Al₃Sc [16]. Данные также содержат в себе гафний и цирконий, ввиду большой растворимости последнего (до 36 % и 35 % соответственно) в фазе Al₃Sc [17, 18]. Стоит отметить, что первичных интерметаллидов с содержанием эрбия при помощи сканирующей микроскопии не выявлено. В тоже время его введение косвенно способствует увеличению количества и размеров интерметаллидов типа Al₃Sc, что и приводит к росту зерна.

В целом, анализ размера и количества

интерметаллидов показывает, что для сплава без добавок гафния и эрбия средний диаметр интерметаллидной частицы составляет 14 мкм, а их удельный объем – 0,43 %. Стоит отметить, что данные результаты являются базовыми, поскольку средний диаметр интерметаллидов является наибольшим из всех представленных, а их удельный объем показывает минимальное значение среди всех исследуемых сплавов. При содержании гафния до 0,05 % и эрбия 0,03 средний размер первичных интерметаллидов составил 4,0 мкм и удельным объемом 0,61 %. С увеличением гафния до 0,16 % происходит увеличение как среднего размера интерметаллидов до 5,7 мкм, так и удельного объема до 0,67 %. В сплаве № 9 средний размер первичных интерметаллидов увеличивается до 6,2 мкм, а также их удельный объем до 0,73 %. С максимальным содержанием гафния и эрбия в сплаве до 0,16 % наблюдается максимальный размер первичных интерметаллидов 9,3 мкм, а также удельный объем до 1,22 %. Отметим, что рост количества и увеличение размеров интерметаллидов происходит в основном за счет Al₃Sc.

Механические свойства

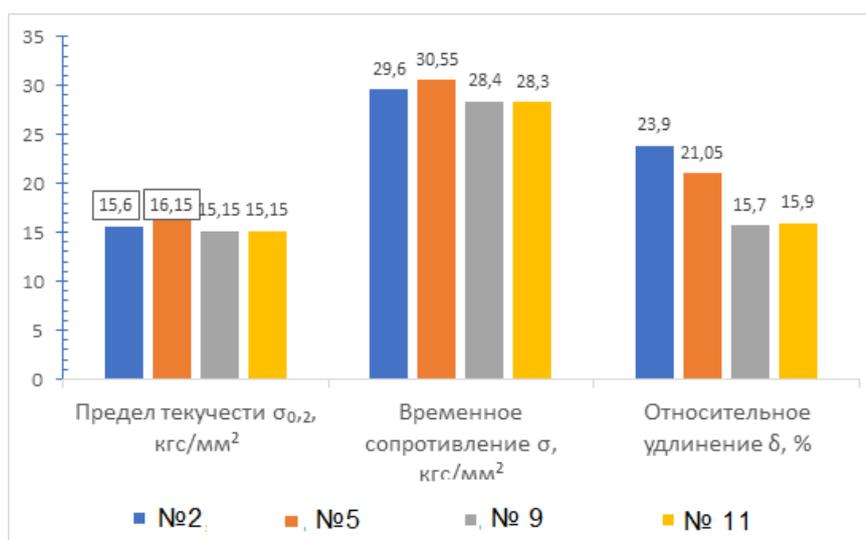


Рисунок 4 – Механические свойства отливки сплавов № 2, № 5, № 9, № 11 при температуре 20 °С

Figure 4 – Mechanical properties of casting alloys No. 2, No. 5, No. 9, No. 11 at a temperature of 20°C

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ER И HF НА ЛИТУЮ МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1590, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

Результаты испытаний механических свойств представлены на рисунке 3. Согласно полученным данным, изменение химического состава и размера зерна не сильно влияет на прочностные свойства, несмотря на измельчения зерна, вызывая лишь небольшой рост в сплаве с содержанием 0,03Er, 0,16Hf. Отметим, что согласно эффекту Холла-Петча это должно привести к улучшению прочностных свойств, но в данном случае такого улучшения не происходит. Такой эффект объясняется наличием крупных интерметаллидных частиц, являющихся концентраторами разрушения [8] и снижающих прочностные свойства. Поэтому эффект повышения прочностных свойств из-за наличия мелкозернистой структуры будет нивелироваться вследствие образования большого числа первичных интерметаллидных частиц. Необходимо отметить, что при увеличении содержания Hf и Er пластичность снижается особенно сильно за счет содержания в нем упомянутых выше частиц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, из полученных результатов прямо следует, что добавки Er и Hf приводят к измельчению зерна и росту количества первичных интерметаллидных частиц типа Al₃Sc. Для того чтобы объяснить эффект влияния Er и Hf на измельчение литой структуры сплава 1590, необходимо еще раз отметить, что Er и Hf сами по себе являются эффективными измельчителями литой структуры. Однако [20] первичные интерметаллиды Al₃Er будут появляться при его концентрации 1 %, а Al₃Hf – при концентрации гафния 1 % [21]. Необходимо отметить, что кристаллизация металла в стальном кокиле проходит в неравновесных условиях, и первичные интерметаллиды Al₃Er, Al₃Hf будут возникать при более низких концентрациях эрбия и гафния, о чем свидетельствуют фазовые диаграммы.

Однако даже в этом случае содержание Er и Hf достаточно мало для формирования первичных интерметаллидов. Так, их концентрация не превышает 0,16 %, и для формирования первичных интерметаллидов нужны значительно большие скорости кристаллизации, чем при литье в стальной кокиль. Сказанное выше также подтверждает отсутствие интерметаллидов в литой микроструктуре исследуемых сплавов при добавках туда гафния и эрбия. Наличие в интерметаллидах Al₃Sc, как уже отмечалось, объясняется его частичной растворимостью в данной фазе.

В то же время, находясь в жидком растворе, гафний и эрбий могут способствовать

измельчению литой структуры. Это может происходить из-за вызываемого ими переохлаждения между твердой и жидкой фазой. Однако влияния переохлаждения недостаточно, чтобы полностью обеспечить наблюдаемое в данной работе измельчение зерна.

Стоит отметить, что в отличие от системы Al-Sc-Zr, в настоящее время не существует поверхностей ликвидуса для систем Al-Sc-Hf и Al-Sc-Er. Основываясь на анализе результатов количества интерметаллидных частиц, близких к Al₃Sc, приводящих к измельчению литой структуры, можно предположить, что они так же, как цирконий, снижают концентрацию скандия, необходимую для формирования первичных интерметаллидов. Это обоснование наиболее вероятное и подкреплено увеличением числа первичных интерметаллидов, таких как Al₃Sc.

Стоит отметить, что положительное влияние на прочностные свойства нивелируется хрупким разрушением, вызываемым формированием интерметаллидов. В то же время получаемая мелкозернистая структура все равно будет играть положительную роль, например, для снижения количества проходов при интенсивной пластической деформации. Добавление слишком большого количества Hf и Er в сплав может значительно ухудшить его пластичность, что создаст препятствия для его возможности деформироваться. Поэтому, осуществив анализ механических свойств, мы можем ограничить содержание таких элементов до 0,03Er и 0,16Hf, чтобы предотвратить серьезное снижение пластичности в результате дальнейшего измельчения зерна.

ВЫВОДЫ

В сплаве 1590, не содержащем гафния и эрбия, наблюдается дендритная структура с размером зерна 373 мкм. При легировании гафнием и эрбием возможно измельчение зерна в литой заготовке сплава 1591 в 10 раз до 32 мкм. Основным механизмом, приводящим к измельчению зерна, является рост количества и размера первичных интерметаллидов типа Al₃Sc, это, вероятно, объясняет тем, что Er и Hf уменьшают концентрацию скандия, необходимую для формирования данных частиц в жидкой фазе. Измельчение зерна не способствует повышению прочности и уменьшает пластичность, так как это приводит к более хрупкому разрушению, вызванному наличием мельчайших частиц. Рекомендуемая концентрация гафния составляет 0,16 %. Дальнейшее повышение его содержания, хотя и будет измельчать зерно, существенно снижает его пластичность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бажин В.Ю., Баранов М.В. Формирование алюминиевой полосы при бесслитковой прокатке // Расплавы. 2005. № 4. С. 55–61.
2. Бажин В.Ю., Баранов М.В. Гибкие фольговые упаковки из алюминиевых сплавов 8XXX и 3XXX // Литейщик России. 2007. № 6. С. 28–31.
3. Бажин В.Ю. Высокопрочные алюминиевые заготовки для получения фольги // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке : сборник материалов 3-й Международной научно-практической конференции. Махачкала : ООО Апробация, 2013. С. 18–20.
4. Totten G.E., MacKenzie D.S. Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes. CRC press, 2003. Т. 1. 1167 с.
5. Rana R.S., Purohit R., Das S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites // International Journal of Scientific and research publications. 2012. Т. 2. № 6. С. 1–7.
6. Sanders R.E., Baumann S.F., Stumpf H.C. Wrought non-heat treatable aluminum alloys // Treatise in Materials Science & Technology. 2012. Т. 31. С. 65.
7. Zakharov V.V. Combined alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium // Metal Science and Heat Treatment. 2014. Т. 56. № 5–6. С. 281–286. doi : 281–286. 10.1007/s11041-014-9746-5.
8. William F. Smith, Hashemi J. Foundations of materials science and engineering : Mcgraw-Hill Publishing, 2006. 1016 с.
9. Hafnium in aluminum alloys: a review / Jia Z.H., Huang H.L., Wang X.L., Xing Y., Liu Q. // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2016. № 29. С. 105–119. doi : 10.1007/s40195-016-0379-0.
10. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium / Li H.Y., Li D.W., Zhu Z.X., Chen B.A., Xin C.H.E.N., Yang C.L., Wei K.A.N.G. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. № 26. С. 3059–3069. doi : 10.1016/S1003-6326(16)64438-2.
11. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys / Shi Z.M., Wang Q., Zhao G., Zhang R.Y. // Materials Science and Engineering: A 2015. № 626. С. 102–107. doi : 10.1016/j.msea.2014.12.062.
12. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives / Davydov V.G., Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostoval D. // Metal Science and Heat Treatment. 1996. № 8. С. 347–352. doi : 10.1007/BF01395323.
13. Optimization of hardening of Al–Zr–Sc cast alloys / Belov N.A., Alabin A.N., Eskin D.G., Istomin-Kastrovskii V.V. // Journal of materials science. 2006. № 41. С. 5890–5899. doi : 10.1007/s10853-006-0265-7.
14. Experimental study and thermodynamic modeling of the Al-Sc-Zr system / Bo H., Liu L.B., Hu J.L., Jin Z.P. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. № 133. С. 82–92. doi : 10.1016/j.commat.2017.02.029.
15. Engler O., Miller-Jupp S. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083 //

Journal of Alloys and Compounds. 2016. Т. 689. С. 998–1010. doi : 10.1016/j.jallcom.2016.08.070.

16. Norman A.F., Prangnell P.B., McEwen R.S. The solidification behaviour of dilute aluminium–scandium alloys // Acta materialia. 1998. Т. 46. № 16. С. 5715–5732. doi : 10.1016/S1359-6454(98)00257-2.

17. Investigation of the phase relations in the Al-rich alloys of the Al-Sc-Hf system in solid state / Rokhlin, L.L., Bochvar, N.R., Boselli, J. & Dobatkina, T.V. // Journal of phase equilibria and diffusion. 2010. № 31. С. 327–332. doi : 10.1007/s11669-010-9710-z.

18. Røyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys // International Materials Reviews. 2005. Т. 50. № 1. С. 19–44. doi : 10.1179/174328005X14311.

19. The Al-Er-Mg ternary system part I: experimental investigation / Saccone A., Cacciamani G., De Negri S., Ferro R. // Journal of phase equilibria. 2002. № 1. С. 29–37. doi : 10.1361/105497102770332180.

20. Al-rich portion of the Al-Hf phase diagram / Rokhlin, L.L., Bochvar, N.R., Dobatkina, T.V. & Leont'ev, V.G. // Russian Metallurgy (Metally) 2009. С. 258–262. doi : 10.1134/S0036029509030124.

Информация об авторах

А. А. Рагазин – инженер ОНИЛ № 4 Самарского университета.

Е. В. Арышенский – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений СибГИУ.

В. Ю. Арышенский – доктор технических наук, доцент, научный руководитель ОНИЛ-4 Самарского университета Самарского университета.

А. М. Дриц – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОНИЛ № 4 Самарского университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета; главный научный сотрудник ОНИЛ-4 Самарского университета.

REFERENCES

1. Bazhin, V.Yu. & Baranov, M.V. (2005). Formation of an aluminum strip during ingotless rolling. Melts, (4), 55-61.
2. Bazhin, V.Yu. & Baranov, M.V. (2007). Flexible foil packages made of aluminum alloys 8XXXX and XXX. Foundry of Russia, (6), 28-31.
3. Bazhin, V.Yu. (2013). High-strength aluminum billets for foil production. In Actual Problems of Modern Science in the 21st Century (pp. 18-20).
4. Totten, G.E. & MacKenzie, D.S. (Eds.). (2003). Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes (Vol. 1). CRC press.
5. Rana, R.S., Purohit, R. & Das, S. (2012). Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ER И HF НА ЛИТУЮ МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1590, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ

- alloys and aluminum alloy composites. International Journal of Scientific and research publications, 2(6), 1-7.
6. Sanders, R.E., Baumann, S.F. & Stumpf, H.C. (2012). Wrought non-heat treatable aluminum alloys. Treatise in Materials Science & Technology, 31, 65.
7. Zakharov, V.V. (2014). Combined alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium. Metal Science and Heat Treatment, 56(5-6). doi : 281-286. 10.1007/s11041-014-9746-5.
8. William F., Smith & Hashemi, J. (2006). Foundations of materials science and engineering. Mcgraw-Hill Publishing.
9. Jia, Z.H., Huang, H.L., Wang, X.L., Xing, Y. & Liu, Q. (2016). Hafnium in aluminum alloys: a review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 29, 105-119. doi : 10.1007/s40195-016-0379-0.
10. Li, H.Y., Li, D.W., Zhu, Z.X., Chen, B.A., Xin, C.H.E.N., Yang, C.L. & Wei, K.A.N.G. (2016). Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 26(12), 3059-3069. doi : 10.1016/S1003-6326(16)64438-2.
11. Shi, Z.M., Wang, Q., Zhao, G. & Zhang, R.Y. (2015). Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys. Materials Science and Engineering: A, 626, 102-107. doi : 10.1016/j.msea.2014.12.062.
12. Davydov, V.G., Elagin, V.I., Zakharov, V.V. & Rostoval, D. (1996). Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives. Metal Science and Heat Treatment, 38(8), 347-352. doi : 10.1007/BF01395323.
13. Belov, N.A., Alabin, A.N., Eskin, D.G. & Istomin-Kastrovskii, V.V. (2006). Optimization of hardening of Al-Zr-Sc cast alloys. Journal of materials science, 41, 5890-5899. doi : 10.1007/s10853-006-0265-7.
14. Bo, H., Liu, L.B., Hu, J.L. & Jin, Z.P. (2017). Experimental study and thermodynamic modeling of the Al-Sc-Zr system. Computational Materials Science, 133, 82-92. doi: 10.1016/j.commatsci.2017.02.029.
15. Engler, O. & Miller-Jupp, S. (2016). Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. Journal of Alloys and Compounds, 689, 998-1010. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.08.070.
16. Norman, A.F., Prangnell, P.B. & McEwen, R.S. (1998). The solidification behaviour of dilute aluminium-scandium alloys. Acta materialia, 46(16), 5715-5732. doi : 10.1016/S1359-6454(98)00257-2.
17. Rokhlin, L.L., Bochvar, N.R., Boselli, J. & Dobatkina, T.V. (2010). Investigation of the phase relations in the Al-rich alloys of the Al-Sc-Hf system in solid state. Journal of phase equilibria and diffusion, 31, 327-332. doi : doi.org/10.1007/s11669-010-9710-z.
18. Røyset, J. & Ryum, N. (2005). Scandium in aluminium alloys. International Materials Reviews, 50(1), 19-44. doi : 10.1179/174328005X14311.
19. Saccone, A., Cacciamani, G., De Negri, S. & Ferro, R. (2002). The Al-Er-Mg ternary system part I: experimental investigation. Journal of phase equilibria, 23(1), 29-37. doi : 10.1361/105497102770332180.
20. Rokhlin, L.L., Bochvar, N.R., Dobatkina, T.V. & Leont'ev, V.G. (2009). Al-rich portion of the Al-Hf phase diagram. Russian Metallurgy (Metally), 2009, 258-262. doi: 10.1134/S0036029509030124.

Information about the authors

A. A. Ragazin - Engineer of ONIL No. 4 of Samara University.

E. V. Aryshensky - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of SibGIU.

V. Yu. Aryshensky - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Supervisor of ONIL-4 of Samara University of Samara University.

A. M. Drits - Candidate of Technical Sciences, a leading researcher at ONIL No. 4 of Samara University.

S. V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of the Siberian State Industrial University; Chief Researcher of ONIL-4 Samara University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.