

УДК 669.715; 621.78

Влияние термической обработки на механические свойства и теплопроводность литейных сплавов системы Al–Zn–Ca–Sc–Hf

Лыскович Анастасия Андреевна^(*)

lyskovich.aa@misis.ru

SPIN-код: 2526-3083

Баженов Вячеслав Евгеньевич

v.e.bazhenov@misis.ru

SPIN-код: 8961-4851

Баранов Иван Ильич

baranov.ii@misis.ru

SPIN-код: 3187-3269

НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. Изучено влияние термической обработки на механические свойства и теплопроводность сплавов системы Al–Zn–Ca–Sc–Hf. Методом микрорентгено-спектрального анализа определено, что структура сплавов представляет собой твердый раствор α -Al и эвтектику α -Al+(Al,Zn)₄Ca. Исследование свойств сплавов в литом состоянии показало, что твердость и теплопроводность образцов практически не менялась по мере замены скандия на гафний. После старения все сплавы продемонстрировали прирост твердости и теплопроводности, однако сплав с максимальным содержанием скандия обладал наиболее высокими свойствами: теплопроводность 184,7 Вт/(м·К) и твердость 93,1 НВ. В ходе механических испытаний на растяжение обнаружено, что по мере замены скандия на гафний прочность сплавов падает. При этом отмечалось увеличение относительного удлинения с 4,6 до 8,0 %.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микроструктура, теплопроводность, твердость, прочность на разрыв, термическая обработка

Effect of heat treatment on mechanical properties and thermal conductivity of the Al–Zn–Ca–Sc–Hf casting alloys

Lyskovich Anastasia Andreevna^(*)

lyskovich.aa@misis.ru

SPIN-code: 2526-3083

Bazhenov Viacheslav Evgenievich

v.e.bazhenov@misis.ru

SPIN-code: 8961-4851

Baranov Ivan Ilyich

baranov.ii@misis.ru

SPIN-code: 3187-3269

NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract. The present study investigates the effect of heat treatment on the mechanical properties and thermal conductivity of Al–Zn–Ca–Sc–Hf alloys. The energy dispersive X-ray spectroscopy was employed to ascertain the alloy structure, which was determined to be a solid solution of α -Al and eutectic α -Al+(Al,Zn)₄Ca. In as-cast state, while scandium, was substituted for hafnium the hardness and thermal conductivity of the samples remained virtually unchanged. After the aging treatment, a general increase in hardness and thermal conductivity was observed among the alloys. However, the alloy with the maximum scandium content

exhibited the highest level of properties, with a thermal conductivity of 184.7 W/(m·K) and a hardness of 93.1 HB. During mechanical tensile tests, it was found that as scandium was replaced by hafnium, the strength of the alloys decreased. Concurrently, a rise in relative elongation from 4.6 % to 8.0 % was observed.

Keywords: aluminum alloys, microstructure, thermal conductivity, hardness, tensile strength, heat treatment

Введение. На сегодняшний день алюминий является одним из наиболее востребованных материалов для производства корпусов различной электронной техники. Сочетание высокой прочности и теплопроводности металла позволяют алюминиевым корпусам превосходить популярные пластиковые. Кроме этого, высокотеплопроводные материалы востребованы в производстве радиаторов охлаждения и аккумуляторов электромобилей из-за необходимости отвода значительного количества тепла, так как от этого напрямую зависит срок их службы.

Большинство литейных алюминиевых сплавов не обладают высокой теплопроводностью. Это связано с высоким содержанием растворенных легирующих элементов в алюминиевом твердом растворе, что, в свою очередь, повышает удельное электросопротивление сплавов [1]. В то же время литье остается наиболее экономически выгодным способом массового производства деталей сложной конфигурации, таких как радиаторы охлаждения.

Объектом исследования в данной работе являются алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Ca–Sc–(Hf). Выбор основных легирующих элементов обусловлен тем, что Ca является эвтектикообразующим элементом практически не растворимым в α -Al твердом растворе, а Zn способен упрочнить алюминиевую матрицу при этом не критично снизив теплопроводность алюминия [2, 3]. Малые добавки Sc и Hf использовались для обеспечения высокой прочности сплава [4, 5].

Целью настоящей работы является исследование микроструктуры, твердости, теплопроводности и прочности на разрыв литых и термообработанных сплавов, относящихся к перспективной системе Al–Zn–Ca–Sc–Hf.

Материалы и методики. В качестве шихты были использованы чистые алюминий (A99), цинк (ЦВ0), лигатуры Al — 10 мас. % Ca, Al — 2 мас. % Sc и Al — 2 мас. % Hf. Выплавка сплавов велась в индукционной печи в графито-шамотном тигле. Перед разливкой при температуре 740 °C проводили рафинирование расплавов гексахлорэтаном от растворенного водорода и неметаллических включений.

Микроструктура и фазовый состав исследуемых сплавов были изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega SBH₃, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments AZtecEnergy. Таблица содержит сведения о химическом составе полученных сплавов. Сплавы подвергали термической обработке: искусственное старение при 300 °C в течение 3 ч ($\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,3}\text{Sc}$ и $\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,2}\text{Sc}_{0,2}\text{Hf}$) и при 300 °C в течение 6 ч ($\text{Al}_3\text{Zn}_2\text{Ca}_{0,1}\text{Sc}_{0,4}\text{Hf}$).

Химический состав исследуемых сплавов

Обозначение	Содержание элемента, масс. %				
	Al	Zn	Ca	Sc	Hf
$\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,3}\text{Sc}$	Осн.	3,09	2,87	0,32	–
$\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,2}\text{Sc}_{0,2}\text{Hf}$	Осн.	3,12	3,13	0,20	0,19
$\text{Al}_3\text{Zn}_2\text{Ca}_{0,1}\text{Sc}_{0,4}\text{Hf}$	Осн.	3,09	3,09	0,10	0,36

Твердость по Бринеллю определяли с применением универсального твердомера INNOVATEST NEMESIS 9001. Прочностные характеристики при растяжении у предварительно состаренных сплавов определялись путем испытаний на цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной 60 мм с использованием универсальной испытательной установки INSTRON 5569. Электропроводность измеряли с помощью вихревого измерителя ВЭ 27НЦ/4-5. Теплопроводность (λ) сплавов рассчитывали на основании значений электропроводности (σ) согласно уравнению Смита и Палмера [6] (1):

$$\lambda = 0,816L_0T\sigma + 17,94, \quad (1)$$

где L_0 — число Лоренца; T — температура, °С.

Результаты. На рис. 1 приведена микроструктура сплавов системы Al–Zn–Ca–Sc–Hf в литом состоянии. Из снимков видно, что в литом состоянии структура всех сплавов состоит из твердого раствора α -Al и эвтектики α -Al+(Al,Zn)₄Ca. С помощью микрорентгеноспектрального анализа было установлено, что скандий достаточно равномерно распределен в твердом растворе и эвтектике, в то время как гафний в основном сосредоточен в центре дендритных ячеек.

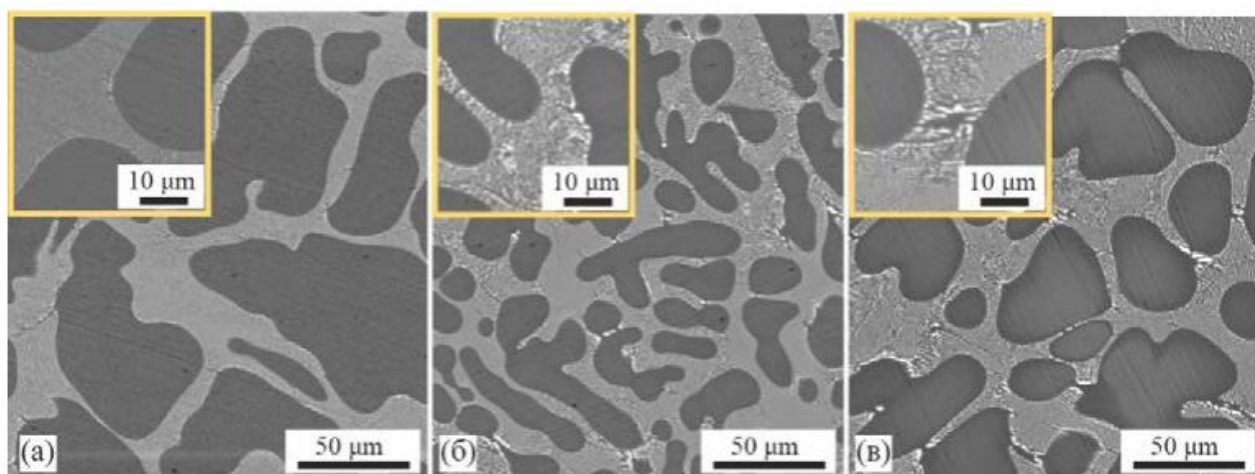


Рис. 1. Микроструктура литого сплавов системы Al–Zn–Ca–Sc–Hf:

a — $\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,3}\text{Sc}$; *б* — $\text{Al}_3\text{Zn}_3\text{Ca}_{0,2}\text{Sc}_{0,2}\text{Hf}$; *в* — $\text{Al}_3\text{Zn}_2\text{Ca}_{0,1}\text{Sc}_{0,4}\text{Hf}$

На рис. 2 представлены свойства сплавов в литом и состаренном состоянии. В литом состоянии теплопроводность сплавов отличается незначитель-

но и составляет 163,8–167,6 Вт/(м·К). Твердость литых образцов также близка и равна 43,3–47,7 НВ. После старения твердость и теплопроводность сплавов заметно возросла. При этом можно наблюдать, что по мере снижения содержания скандия в сплавах теплопроводность и твердость сплавов снижается с 184,7 до 171,1 Вт/(м·К) и с 93,1 до 61,8 НВ, соответственно. Результаты испытаний на растяжение согласуются с результатами измерения твердости состаренных сплавов. По мере снижения количества скандия в сплавах, предел текучести снизился с 217 до 103, а предел прочности с 268 до 170 МПа. В то же время можно видеть, что гафний благоприятно влияет на удлинение сплавов увеличивая его с 4,6 до 8,0 %.

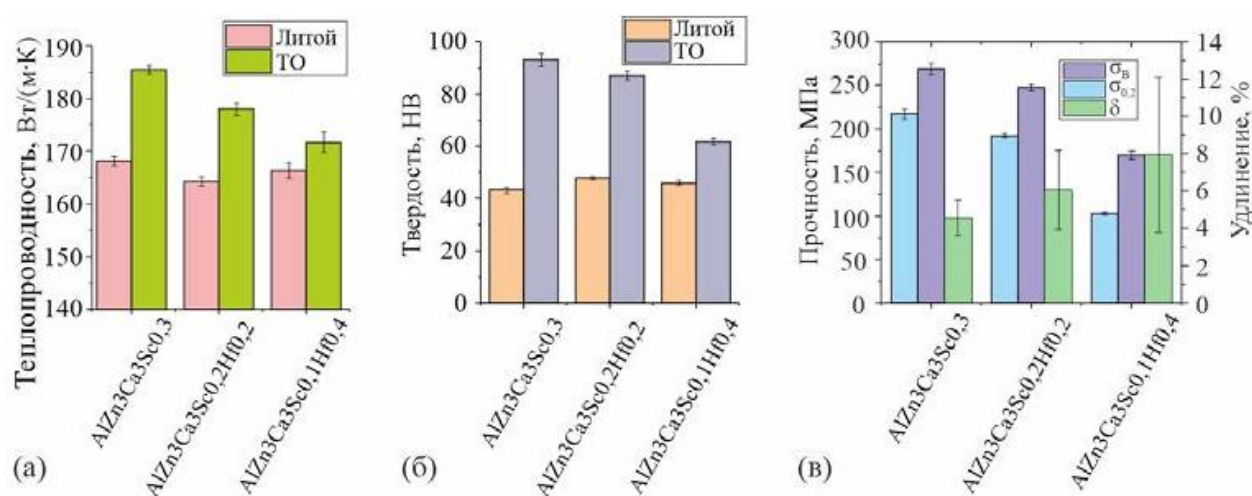


Рис. 2. Теплопроводность (а), твердость (б) и механические свойства (в) после термической обработки (ТО) сплавов системы Al–Zn–Ca–Sc–Hf

Обсуждение полученных результатов. Согласно литературе [7, 8], в процессе старения при температуре 300 °С происходит выделение из твердого раствора α -Al скандия и гафния с образованием фаз Al_3Sc и Al_3Hf . В соответствии с результатами, полученными в настоящей работе, также можно утверждать, что происходит процесс распада твердого раствора α -Al и образование упрочняющих дисперсоидов, о чем свидетельствует рост теплопроводности и твердости сплавов. Кроме того, ранее было доказано, что гафний имеет большую растворимость в фазе $L1_2-Al_3Sc$, преобразуя ее в $L1_2-Al_3(Sc, Hf)$ [9].

Закключение. Замена скандия на гафний не оказало значительного влияния на структуру, теплопроводность и твердость сплавов в литом состоянии. Термическая обработка при 300 °С оказалась эффективной и способствовала улучшению механических свойств и росту теплопроводности сплавов. При этом данное исследование продемонстрировало, что гафний уступает скандию в упрочняющем эффекте.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00682).

Список источников

- [1] Mujahid M., Engel N.N., Chia E.H. Effect of Alloying Elements on the Conductivity of Aluminum Alloys. *Metall*, 1979, vol. 13, pp. 887–893.
- [2] Zhang A., Li Y. Effect of alloying elements on thermal conductivity of aluminum. *Journal of Materials Research*, 2023, vol. 38, no. 8, pp. 2049–2058.
- [3] Belov N.A., Batyshev K.A., Doroshenko V.V. Microstructure and phase composition of the eutectic Al–Ca alloy, additionally alloyed with small additives of zirconium, scandium and manganese. *Non-ferrous Metals*, 2017, vol. 43, art. no. 49.
- [4] Nokhrin A., Shadrina I., Chuvil'deev V. et al. Investigation of thermal stability of microstructure and mechanical properties of bimetallic fine-grained wires from Al–0.25% Zr–(Sc, Hf) alloys. *Materials*, 2021, vol. 15, no. 1, art. no. 185.
- [5] Belov N.A., Naumova E.A., Alabin A.N., Matveeva I.A. Effect of scandium on structure and hardening of Al–Ca eutectic alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 646, pp. 741–747.
- [6] Лыскович А.А., Баженов В.Е., Баранов И.И. Исследование теплопроводности литейных сплавов системы Al–Zn–Ca–(Sc). *Металлургия XXI столетия глазами молодых. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов: сб. докл.* Донецк, Изд-во Донецкий национальный технический университет, 2024, с. 91–93.
- [7] Costa S., Puga H., Barbosa J., Pinto A.M.P. The effect of Sc additions on the microstructure and age hardening behavior of as cast Al–Sc alloys. *Materials & Design*, 2012, vol. 42, pp. 347–352.
- [8] Norman A.F., Tsakiroopoulos P. The microstructure and properties of rapidly solidified Al–Hf alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 1991, vol. 134, pp. 1234–1237.
- [9] Popova E., Kotenkov P., Shubin A., Gilev I. Formation of metastable aluminides in Al–Sc–Ti (Zr, Hf) cast alloys. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 26, pp. 1515–1523.