

Научная статья

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

УДК 536.425

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА МИКРОСТРУКТУРНУЮ КОМПОЗИЦИЮ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ**Игорь Александрович Зорин¹, Александр Михайлович Дриц²,
Евгений Владимирович Арышенский^{3†}, Сергей Валерьевич Коновалов⁴,
Федор Васильевич Гречников⁵, Виктор Сергеевич Комаров⁶**^{1, 2, 3, 5} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия⁴ Сибирский государственный индустриальный университет, Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия⁶ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский проспект 4, 119991, Москва, Россия⁶ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Ленинский проспект 49, 119334, Москва, Россия¹ zorin_20@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>² dritsam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>³ arishenskiy.ev@ssau.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>⁴ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁵ gretch@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3767-4004>⁶ kom1107@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния комплексного легирования алюминиевых сплавов магнием, марганцем, скандием, цирконием и гафнием. С этой целью в стальной кокиль были отлиты слитки А85, а также сплавы систем Al–Mg, Al–Mg–Sc, Al–Mg–Mn–Sc и сплав 1570 в том числе с добавками гафния 0,5 %. У всех сплавов изучена зёрненная структура, интерметаллидные включения и механические свойства. Для сплавов 1570 и 1570–_{0,5}Hf дополнительно на просвечивающем электронном микроскопе изучались наночастицы типа Al₃(ПЭ1х, ПЭ2(1–х)). Анализ зеренной структуры показал, что увеличение содержания магния, а затем марганца, а после добавки скандия (до 0,3 %) постепенно снижают размер зерна. Однако в целом зёрненная структура остается дендритной. Равноосная структура появляется лишь при комбинированном скандиево-циркониевом легировании, а добавки гафния позволяют добиться её дополнительного измельчения. При увеличении содержания легирующих элементов растет количество крупных интерметаллидных частиц, формирующихся при кристаллизации. Необходимо отметить, что во многих крупных неравновесных частицах содержится большое количество скандия и циркония. Добавки гафния уменьшают количество скандия и циркония в крупных интерметаллидных частицах, повышая их содержание в пересыщенном твердом растворе. Рост содержания мелкодисперсных частиц, образующихся при остывании слитка, наблюдается лишь после комбинированного скандиево-циркониевого легирования в результате прерывистого распада. При добавлении гафния выпадение наночастиц из пересыщенного твердого раствора при остывании слитка практически прекращается. Механические свойства в литом состоянии вначале растут вследствие твердорастворного упрочнения и измельчения зерна, а затем за счет появления частиц типа Al₃(Sc,Zr).

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, легирование малыми добавками переходных элементов, микроструктура, интерметаллиды.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22–29–01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>.

Для цитирования: 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.

Original article

EFFECT OF TRANSITION METALS ON AS-CAST ALUMINUM ALLOYS MICROSTRUCTURE COMPOSITION

Igor A. Zorin¹, Alexander M. Drits², Evgenii V. Aryshenskii^{3†}, Sergei V. Konovalov⁴,
Fedor V. Grechnikov⁵, Viktor S. Komarov⁶

^{1, 2, 3, 5} Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, 443086, Samara, Russia

⁴ Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

⁶ National Research Technological University "MISIS", Leninsky Pr., 4, Moscow, 119991, Russia

⁶ A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Pr., 49, Moscow, 119334, Russia

¹ zorin_20@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>

² dritsam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>

³ arishenskiy.ev@ssau.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

⁴ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁵ gretch@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3767-4004>

⁶ kom1107@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>

Abstract. The study addresses the effect of aluminum alloys complex alloying with magnesium, manganese, scandium, zirconium and hafnium. For this purpose, A85 ingots as well as Al–Mg, Al–Mg–Sc, Al–Mg–Mn–Sc system alloys and 1570 alloy, including those with 0.5 % hafnium additions were cast into a steel mold. Microhardness, electrical conductivity, grain structure, intermetallic inclusions and mechanical properties were studied for all alloys. For 1570 and 1570 + 0.5 % Hf alloys, Al₃(TE1x, TE2(1-x)) type nanoparticles were additionally studied using transmission electron microscope. Grain structure analysis showed that magnesium, and then manganese content increase, as well as scandium addition (up to 0.4 %) gradually reduce the grain size. However, overall grain structure maintains its dendritic structure. An equiaxed structure appears only with combined addition of scandium-zirconium, while hafnium addition facilitates its extra refinement. Increasing alloying elements content leads to the growing number of large intermetallic particles, forming during crystallization. It should be noted that many coarse non-equilibrium particles contain large amounts of scandium and zirconium. Hafnium additions reduce scandium and zirconium amount in coarse intermetallic particles, increasing their content in supersaturated solid solution. The increasing content of fine particles, formed during ingot cooling, is observed as a result of discontinuous decomposition only after combined addition of scandium-zirconium. With hafnium addition precipitation of nanoparticles from a supersaturated solid solution practically stops during ingot cooling. As-cast mechanical properties grow initially due to solid-solution hardening and grain refinement, and then due to particles Al₃(Sc,Zr) type particles emergence.

Keywords: aluminum alloys, alloying with small additions of transition elements, microstructure, intermetallic compound.

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Academy of Sciences No. 22-29-01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>.

For citation: Zorin, I. A., Drits, A. M., Aryshenskii, E. V., Konovalov, S. V., Grechnikov, F. V. & Komarov, V. S. (2022). Effect of transition metals on as-cast aluminum alloys microstructure composition. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 520–531. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011.

Введение

Алюминиевые сплавы занимают лидирующее положение в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники. Развитие гражданской авиации и перспектива создания самолетов с длительным ресурсом вызывает необходимость расширения работ по созданию новых материалов и сплавов [1-3].

В связи с этим ведутся интенсивные исследования по разработке новых и совершенствованию существующих алюминиевых сплавов [4-

6]. Наиболее распространенными легирующими добавками в алюминиевых сплавах являются магний и марганец, которые значительно повышают их прочностные свойства за счет твердорастворного упрочнения [7, 8]. Однако наиболее популярным является легирование малыми добавками скандия.

Скандий непосредственно при кристаллизации образует пересыщенный твердый раствор, который может распадаться при последующем нагреве >250 °С. При этом образуются дисперсные и когерентные матрице наночасти-

цы фазы Al_3Sc , которые обеспечивают существенный прирост прочностных свойств [9]. Он измельчает также зерно в процессе литья, что так же благоприятно влияет на повышение прочностных свойств сплава [9].

Эффективными добавками в алюминиевые сплавы являются также цирконий и гафний. Цирконий является сильным модификатором и дополнительно вводится в сплавы, содержащие скандий. Он способствует измельчению микроstructures и повышает механические свойства [9, 10]. Гафний так же измельчает зёрненную структуру [11], и снижает скорость диффузии скандия, делая частицы Al_3Sc значительно более термостабильными [12].

Есть значительное количество исследований, показывающих, как изменяются прочностные свойства, зёрненная структура и интерметаллидные частицы в конкретных сплавах, при добавлении в них по отдельности Sc, Zr, Mg, Mn и Hf [6, 9, 13-18]. Однако в настоящее время отсутствуют исследования, показывающие

комплексное влияние данных элементов на свойства сплава, позволяющие оценить вклад каждого из них на прочностные свойства и размеры зеренной структуры при литье. Исследования данного вопроса является целью данной статьи.

Методика исследований

Образцы из модельных сплавов производили в лабораторных условиях (в индукционной печи средней частоты, размеры слитков $20 \times 40 \times 400$, отливали в водоохлаждаемый стальной кокиль при температуре расплава ($720-740$) °C). В процессе исследования шаг за шагом увеличивалась концентрация химических элементов, чтобы посмотреть, как они будут влиять на зёрненную структуру и механические свойства.

В таблице 1 представлен химический состав всех исследуемых сплавов.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов, %

Table 1. Chemical composition of the studied alloys, %

| Сплав | Al | Si | Fe | Mn | Mg | Ti | Zr | Sc | Hf |
|---------------------------------|------|-------|-------|---------|-------|-------|------|------|-----|
| A85 | осн. | 0,03 | 0,07 | 0,002 | 0,004 | 0,003 | – | – | – |
| Al-Mg | осн. | 0,003 | 0,004 | <0,0005 | 1,03 | 0,005 | – | – | – |
| Al-4Mg | осн. | 0,005 | 0,003 | <0,0005 | 3,85 | 0,006 | – | – | – |
| $Al_{-5,5}Mg_{-0,3}Sc$ | осн. | 0,03 | 0,06 | 0,006 | 5,5 | 0,006 | – | 0,31 | – |
| $Al_{-6,3}Mg_{-0,4}Mn_{-0,2}Sc$ | осн. | 0,013 | 0,006 | 0,37 | 6,33 | 0,013 | – | 0,24 | – |
| 1570 | осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | – |
| $1570_{-0,5}Hf$ | осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | 0,5 |

Экспериментальные плавки проводились в среднечастотной индукционной печи с использованием графитового тигля. Вес расплава составлял 4-5 кг. Масса отлитого слитка составляла 3 кг. В качестве шихты для сплава использовались следующие материалы: алюминий (чистота 99,8 %), магний (99,9 %), мастер-сплав Al-2%Sc, силумин Al-12%Si, мастер-сплав Al-5%Zr. Температура литья составляла 720-740 °C. Перед заливкой расплавленного металла в литейную форму его рафинировали карналлитовым флюсом, вводимым из расчета 5 г на 1 кг шихты. После этого с поверхности расплавленного металла удалялся ликвационный слой. После затвердевания слиток извлекался из кокиля и охлаждался в воде.

Зёрненную структуру образцов исследовали на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert-40 MAT. Подготовка микрошлифов включала вырезку образцов, механическое шлифование, полирование, а также электрополировку во фтороборном электролите состава: борная ки-

слота – 11 г, фтористоводородная кислота – 30 мл, вода дистиллированная – 2200 мл. Для каждого образца (в случае прохождения рекристаллизации) методом секущих ГОСТ 21073.2 измеряли средний размер зерна.

Для тех же режимов обработки с применением СЭМ JEOL 6390A исследовали интерметаллидные частицы. Методика подготовки образцов состояла в механической шлифовке, полировке и электрополировке. Электрополировку проводили при температуре 85-110 °C и напряжении 10-30 В в электролите следующего состава: 500 мл H_3PO_4 ; 300 мл H_2SO_4 ; 50 г CrO_3 ; 50 мл H_2O . Изучение химического состава структурных составляющих методом энергодисперсионной спектроскопии при помощи детектора X-Max 80T в диапазоне энергий 0-10 кэВ (энергетическое разрешение детектора составляет 122 эВ). Микроstructure для сплавов 1570 и $1570_{-0,5}Hf$ дополнительно исследовали на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 при напряжении 200 кВ. Эле-

ментный анализ выполнен с помощью рентгеновской энергодисперсионной системы OXFORD Instruments, INCA Energy. Образцы для исследований методом ПЭМ были подготовлены путём механической и электролитической полировки.

Результаты и их обсуждение

Исходная структура чистого алюминия марки А85 (рис.1а) представляет собой столбчатые зерна, идущие от края к центру слитка со средним размером зерна около 700 мкм (рис.2).

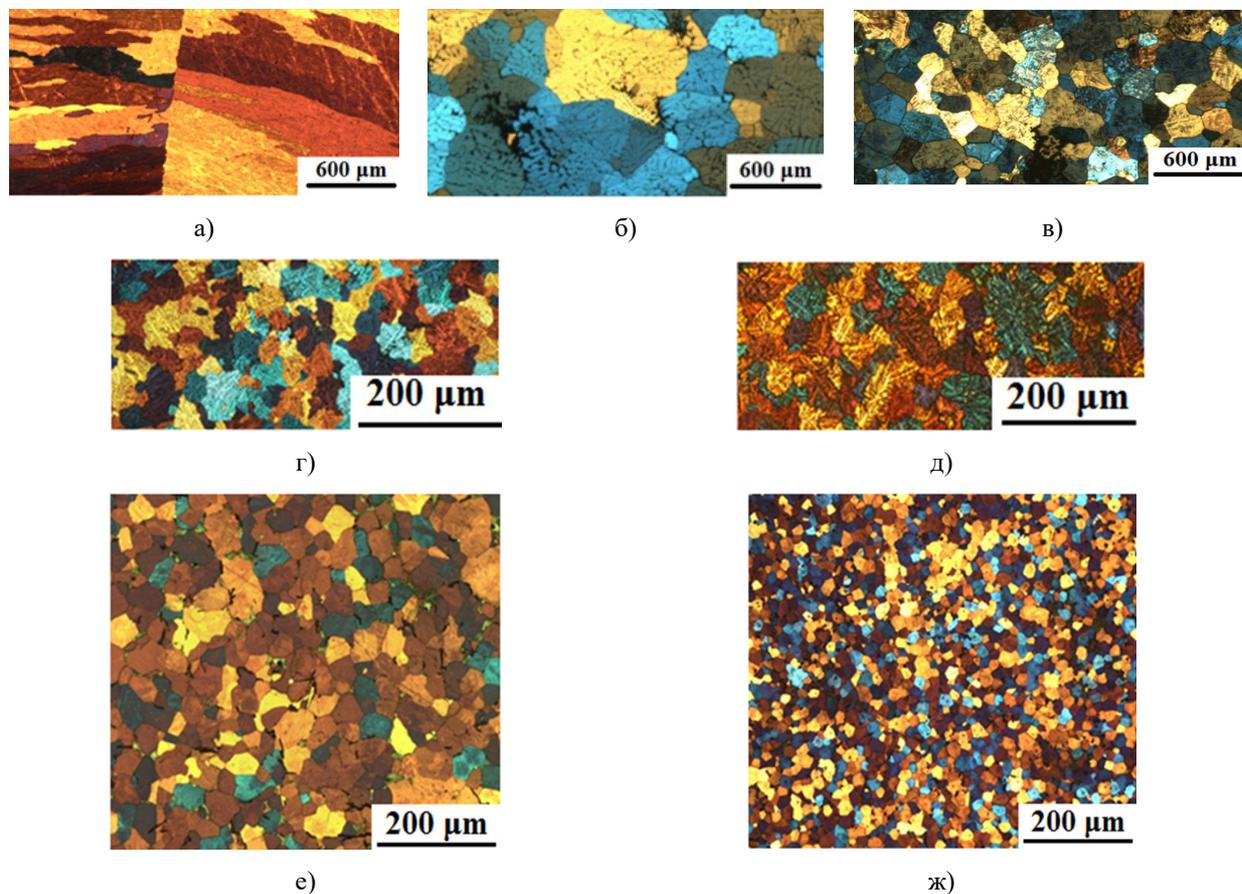


Рис.1. Микроструктура сплавов в литом состоянии: а) А85, б) Al-Mg, в) Al-4Mg, г) Al-5,5Mg-0,3Sc, д) Al-6,3Mg-0,4Mn-0,2Sc, е) 1570, ж) 1570-0,5Hf

Fig.1. Microstructure of cast alloys: а) А85, б) Al-Mg, в) Al-4Mg, д) Al-5,5Mg-0,3Sc, е) Al-6,3Mg-0,4Mn-0,2Sc, е) 1570, г) 1570-0,5Hf

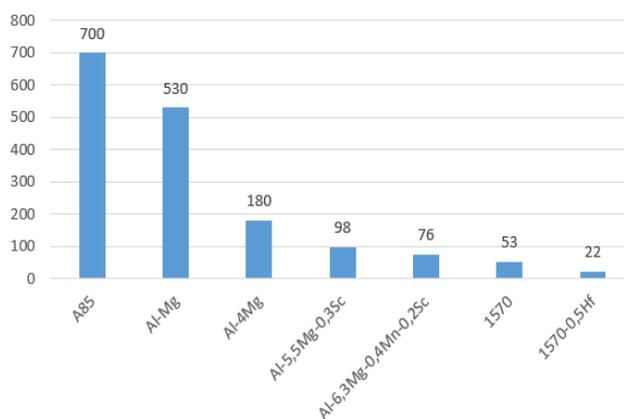


Рис.2. Средний размер зерна литых образцов, мкм

Fig.2. Average grain size of cast samples, microns

Такая форма и размер структуры в целом характерны для алюминиевых сплавов [15].

При добавлении магния (рис.1б) наблюдается более мелкозернистая структура. Это объясняется тем, что увеличивается смачиваемость между твердой и жидкой фазой, которая, в итоге, уменьшает энергию натяжения в жидком растворе, в результате чего, образуется большее количество кристаллизационных центров [16]. При дальнейшем увеличении концентрации магния данный эффект усиливается (рис.1в). Добавки скандия приводят к дальнейшему измельчению зерна до 98 мкм (см. рис.1д и рис.2). Однако, здесь также сохраняется дендритная структура, что объясняется переохлаждением на границе жидкости и зародыша новой фазы, так как скандий в данных сплавах не достигает эвтектической концентрации и не образует первичных частиц Al_3Sc . Повышение концентрации марганца несколько снижает размер зёрненной структуры, хотя она остается дендритной (рис.1д). Основным механизмом уменьшения размеров зерна здесь по-прежнему является снижение поверхностного натяжения между зародышем и жидкой фазой.

На рис.1е представлена микроструктура сплава 1570 с совместным циркониево-скандиево микролегированием, которая после литья обла-

дает равноосным зерном со средним размером зерен 53 мкм (рис.2). Исчезновение дендритной и появление равноосной структуры в 1570 при содержании 0,22 % скандия вызвано действие циркониевого микролегирования. Цирконий уменьшает растворимость скандия, в том числе и в жидкой фазе, в результате чего первичные частицы Al_3Sc образуются уже при 0,2 % скандия [9]. Это и приводит, к наблюдаемому на рис.1е равноосному зерну.

Самый сильный модифицирующий эффект показал сплав 1570–0,5Hf (рис.1ж) его зерно оказалось почти в 2,5 раза меньше, чем в отливке без гафния, а именно 22 мкм (рис.2). Добавки гафния приводят к дальнейшему измельчению зёрненной структуры за счет появления в жидкой фазе частиц Al_3Hf по перетектической реакции [11], так как концентрация гафния в данном сплаве превышает 0,43 %.

В технически чистом алюминии присутствуют характерные для данного сплава частицы Al_8Fe_2Si , размер которых составляет в среднем 5 мкм (рис.3). Мелкодисперсные частицы в данном сплаве практически отсутствуют. В твердом растворе присутствует небольшая доля Fe и Si являющихся неизбежными примесями в любых алюминиевых сплавах.

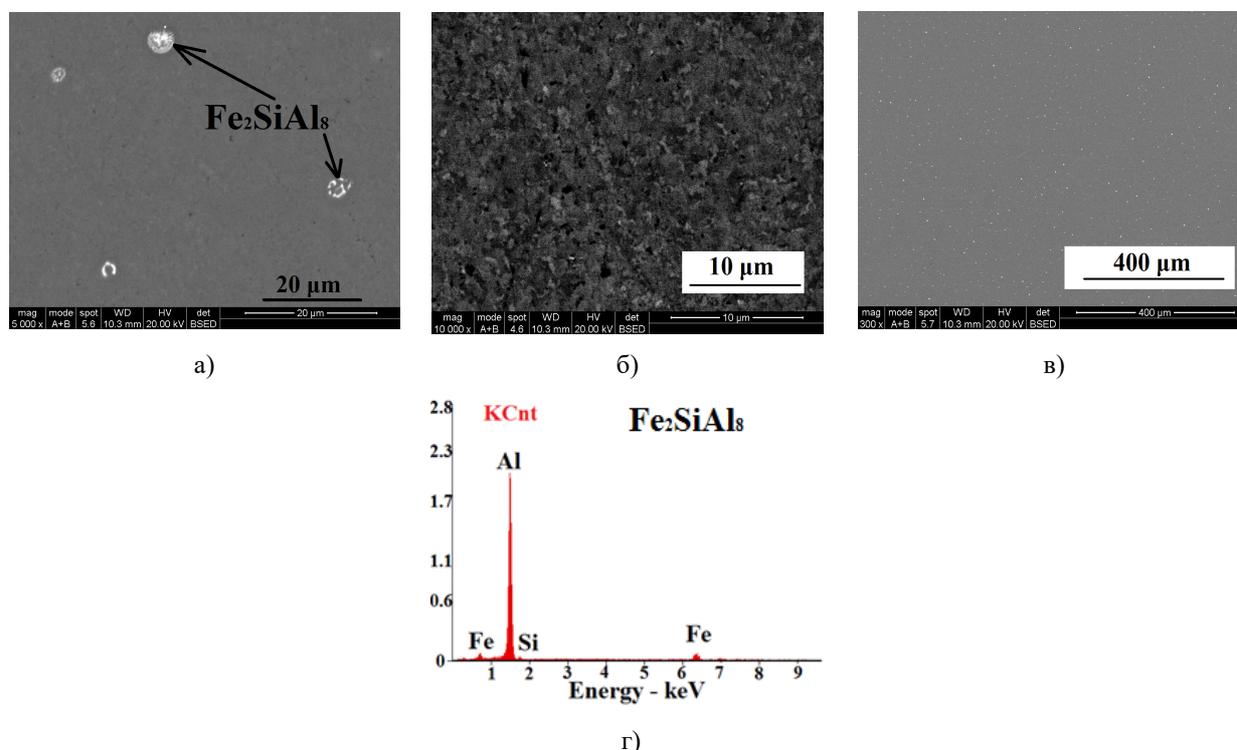


Рис.3. Изображения СЭМ сплава А85:

- а) основные типы интерметаллидных соединений, б) мелкие дисперсоиды, в) крупные частицы, г) результат рентгеноструктурного анализа

Fig.3. SEM images of alloy A85:

- a) the main types of intermetallic compounds, b) small dispersoids, c) large particles, d) the result of X-ray diffraction analysis

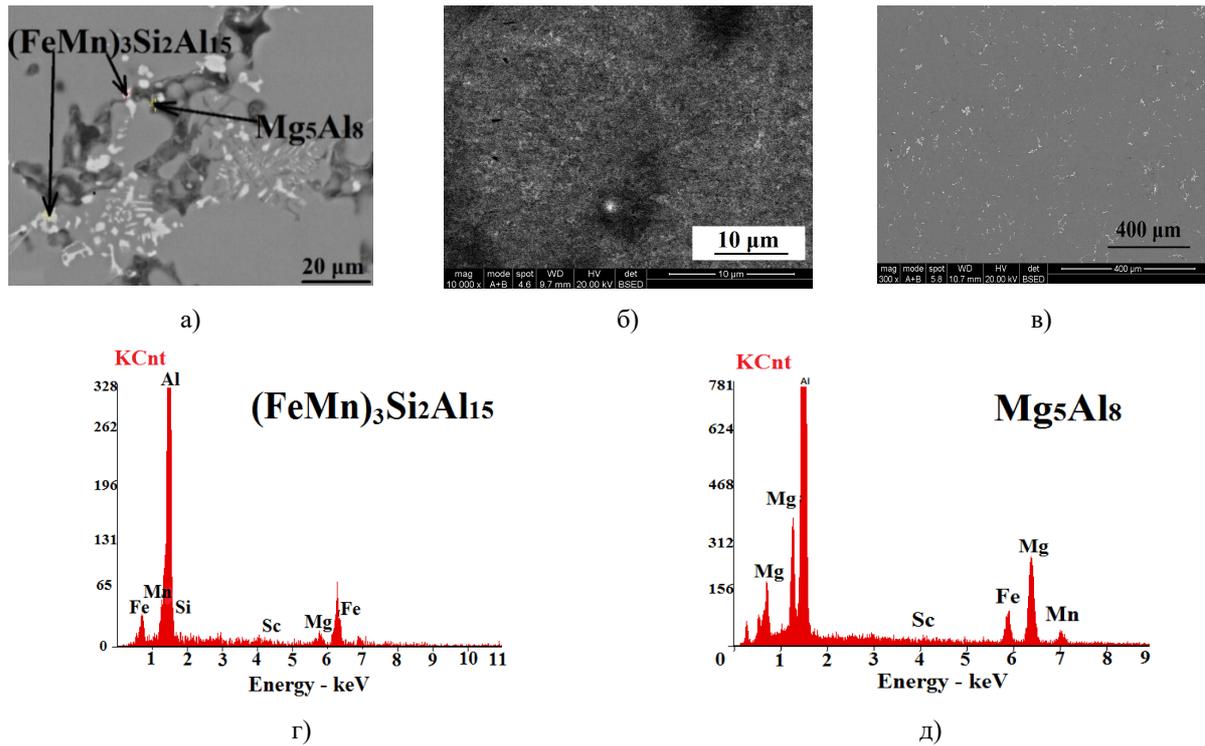
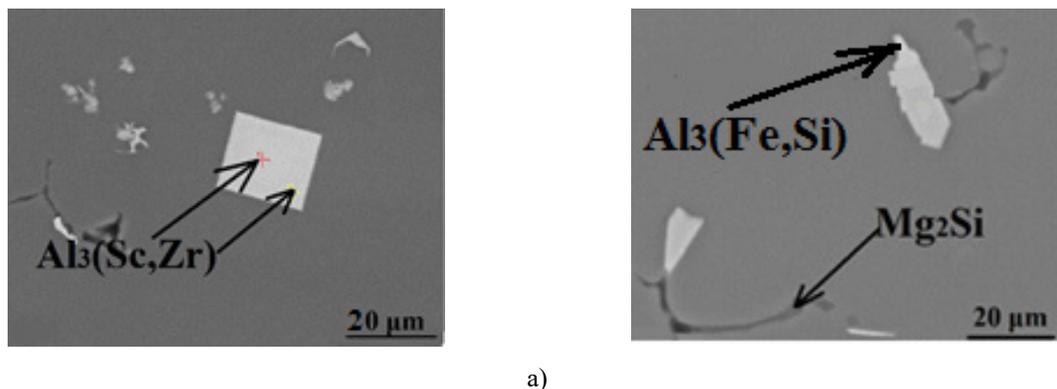


Рис.4. Изображения СЭМ сплава $Al_{-6,3}Mg_{-0,4}Mn_{-0,2}Sc$:
 а) основные типы интерметаллидных соединений, б) мелкие дисперсоиды,
 в) крупные частицы, г) результат рентгеноструктурного анализа

Fig.4. SEM images of the $Al_{-6,3}Mg_{-0,4}Mn_{-0,2}Sc$ alloy:
 a) the main types of intermetallic compounds, b) small dispersoids,
 c) large particles, d) the result of X-ray diffraction analysis

В сплаве $Al_{-6,3}Mg_{-0,4}Mn_{-0,2}Sc$ при добавлении марганца образуется типичное для данных сплавов соединение $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ (рис.4) [19]. Количество данных частиц по сравнению с частицами Al_3Fe и Al_3Si значительно возрастает. Количество интерметаллидных частиц типа Mg_5Al_8 остаётся на прежнем уровне. Последние как правило соседствуют с частицами $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$. Мелкодисперсные частицы в данном сплаве так же практически отсутствуют, а в пересыщенном твердом растворе наблюдается повышенное содержания скандия и марганца.

В сплаве 1570 наблюдаются большое количество частиц типа $Al_3(Fe,Si)$ (рис.5). Кроме них наблюдаются магниевосодержащие частицы бета фазы типа Mg_2Si . При кристаллизации так же возникают уже упоминавшиеся выше эвтектические частицы $Al_3(Sc,Zr)$. Сканирующая микроскопия не показывает наличия мелкодисперсных частиц. Как будет показано далее это объясняется тем, что последние представлены в основном метастабильными фазами $Al_3(Sc,Zr)$ и имеют наноразмер. В твердом растворе наблюдается в основном магний, а скандий и цирконий содержатся в уже упомянутых наночастицах.



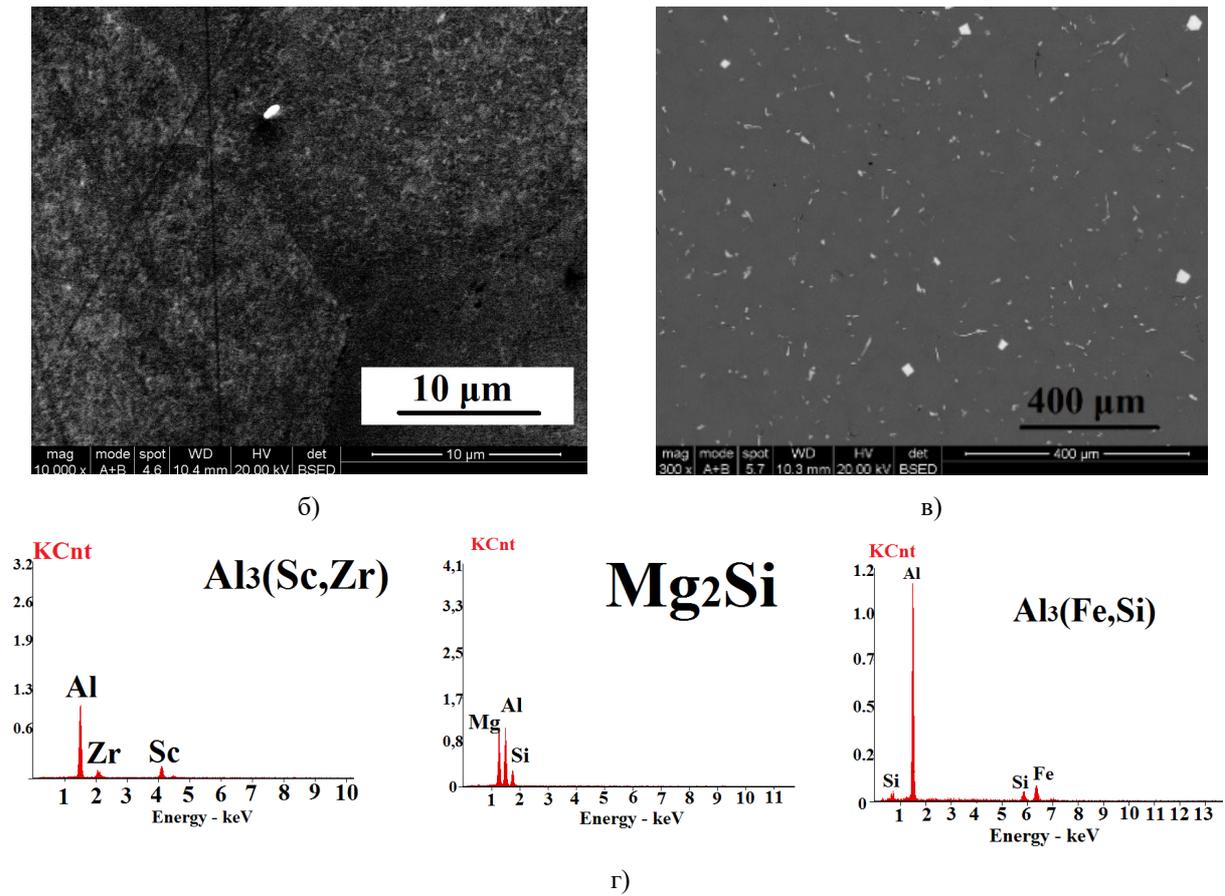
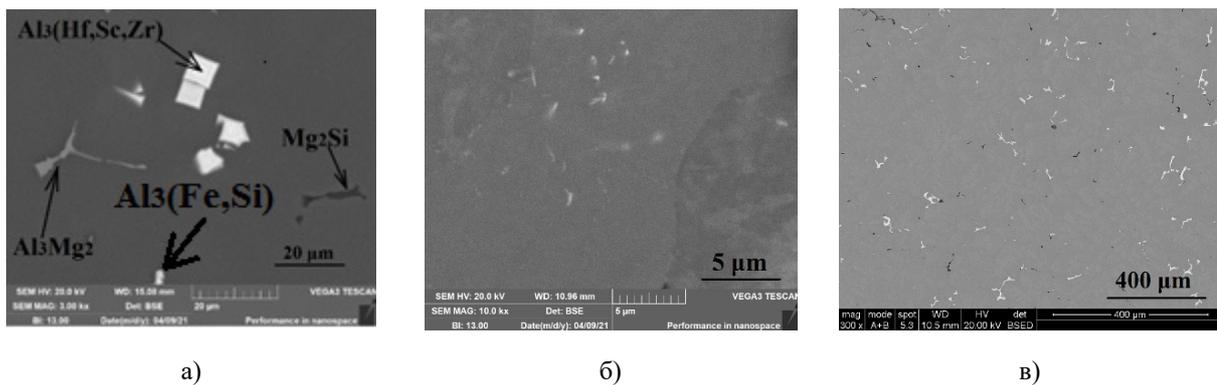


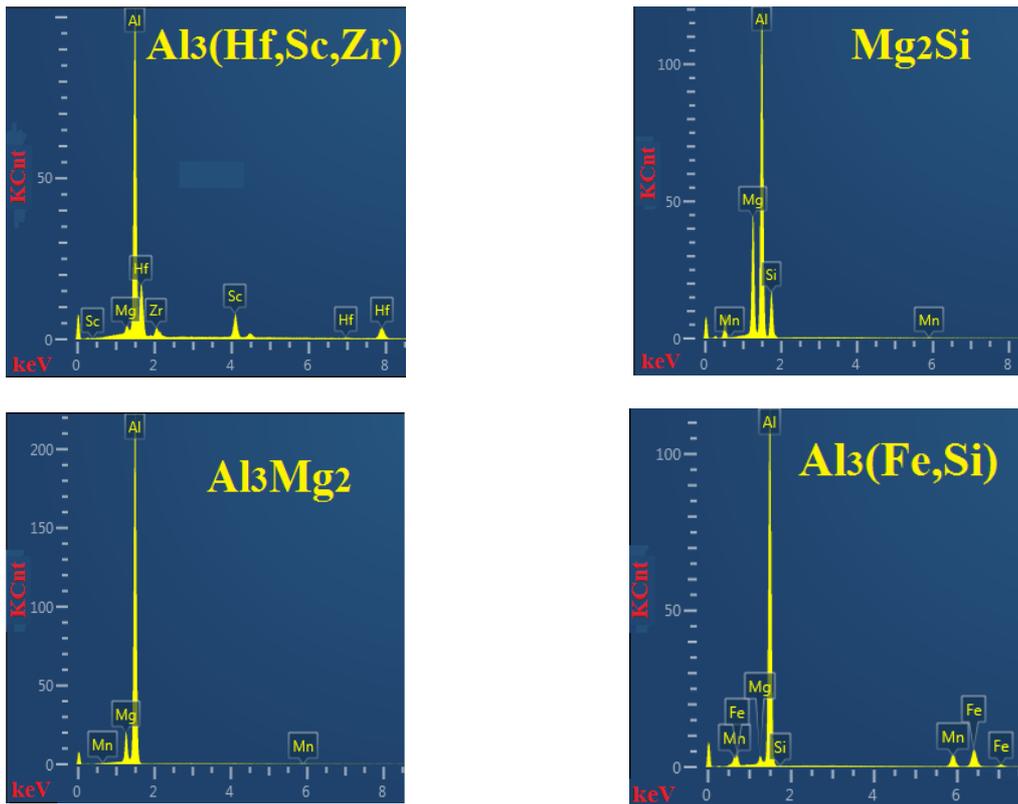
Рис.5. Изображения СЭМ сплава 1570:

а) основные типы интерметаллидных соединений, б) мелкие дисперсоиды, в) крупные частицы, г) результат рентгеноструктурного анализа

Fig.5. Images of SEM alloy 1570:

а) the main types of intermetallic compounds, б) small dispersoids, в) large particles, д) the result of X-ray diffraction analysis





г)

Рис.6. Изображения СЭМ сплава 1570_{-0,5}Hf:
а) основные типы интерметаллидных соединений, б) мелкие дисперсоиды,
в) крупные частицы, г) результат рентгеноструктурного анализа

Fig.6. SEM images of alloy 1570_{-0,5}Hf:

а) the main types of intermetallic compounds, б) small dispersoids,
в) large particles, д) the result of X-ray diffraction analysis

В сплаве 1570, легированном 0,5 % гафния присутствуют частицы $Al_3(Fe,Si)$ (представленные на рис.6в). Наблюдаются также частицы типа Al_3Mg_2 и Mg_2Si и частицы $Al_3(Sc,Zr,Hf)$ эвтектического происхождения. Наличие в них гафния объясняется тем, что согласно [20] гафний может растворяться в частицах Al_3Sc . В данном сплаве сканирующая микроскопия позволила выявить некоторое количество вееро-

образных продолговатых частиц. Учитывая их продолговатую форму, близкое расположение к большеугловым границам и веерообразный характер их выпадения можно предположить, что это частицы Al_3Sc возникающие при прерывистом выпадении [21, 22]. Твердый раствор в данном сплаве содержит магний и в нем так же достаточно много скандия и циркония.

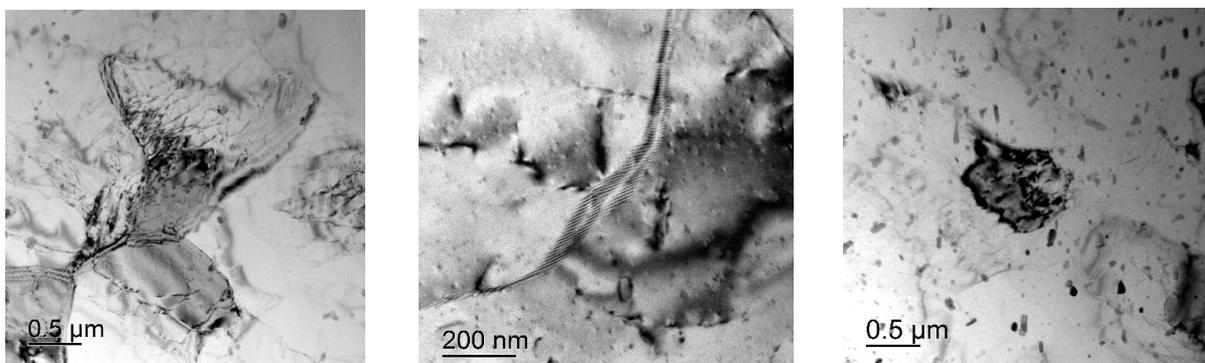


Рис.7. Изображения тонкой структуры сплава 1570

Fig.7. Images of the fine structure of alloy 1570

В сплаве 1570 методами просвечивающей микроскопии выявлены как небольшие когерентные и полукogerентные наночастицы (рис.7), которые по химическому составу близ-

ки к $Al_3(Sc,Zr)$ (рис.8) так и более крупные иглообразные частицы того же химического состава, образовавшиеся в результате прерывистого выделения.

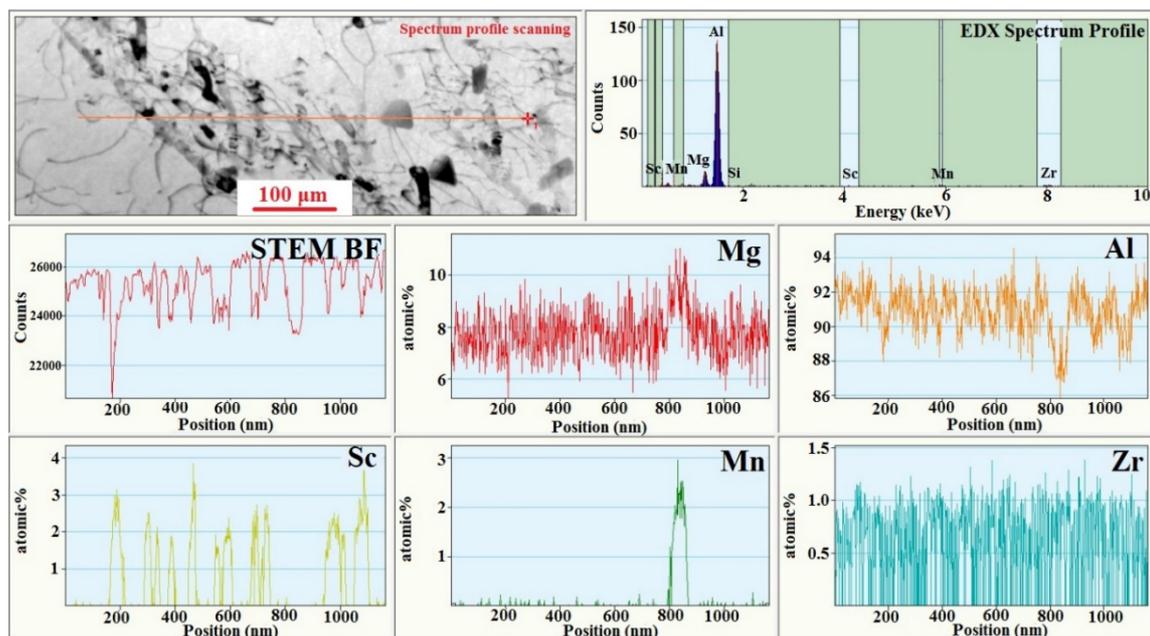


Рис.8. Энергодисперсионная рентгеновая спектроскопия сплава 1570

Fig.8. Energy dispersive X-ray spectroscopy of alloy 1570

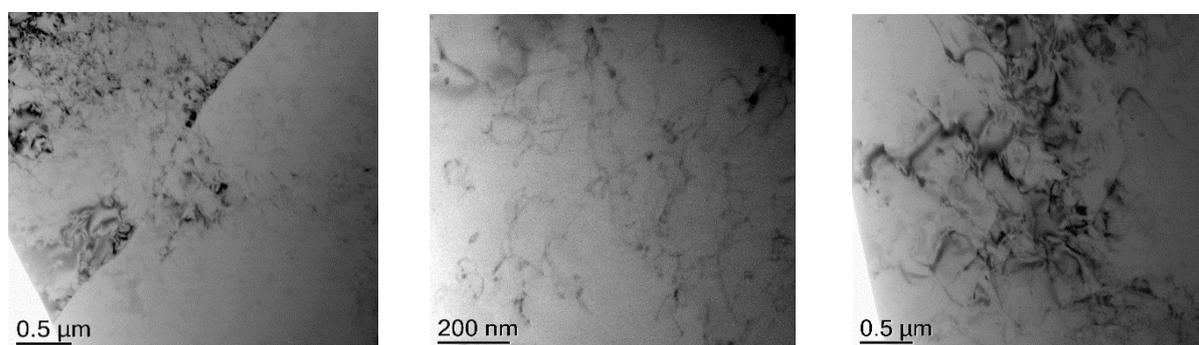


Рис.9. Изображения тонкой структуры сплава $1570_{-0.5}Hf$

Fig.9. Images of the fine structure of the alloy $1570_{-0.5}Hf$

В сплаве $1570_{-0.5}Hf$ наночастицы отсутствуют (рис.9). Это объясняется наличием крупных эвтектических частиц того же состава, которые забирают в себя часть Sc,Zr,Hf. Однако более вероятным видится то, что гафний снижает диффузию скандия и замедляет образование вышеупомянутых частиц $Al_3(Sc,Zr,Hf)$. Этот факт так же подтверждается тем, что значительная доля Sc и Zr находится в пересыщенном твердом растворе.

При добавлении в сплав магния происходит постоянный рост прочностных показателей (рис.10). Скандий без добавления других переходных элементов не сильно влияет на механи-

ческие свойства, а повышение прочности в сплаве $Al_{-6.3}Mg_{-0.4}Mn_{-0.25}Sc$ можно объяснить появлением марганца в твердом растворе. При добавлении циркония в сплав 1570 механические свойства растут более интенсивно, что можно объяснить измельчением зёрновой структуры, а также появлением наночастиц типа $Al_3(Sc,Zr)$. После добавления 0,5 % гафния уровень прочностных свойств несколько уменьшается. Это связано с тем, что Hf снижает диффузию скандия и препятствует выпадению частиц типа Al_3Sc из пересыщенного твердого раствора.

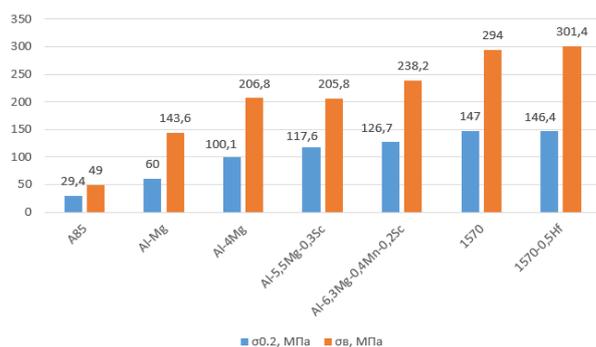


Рис.10. Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести, МПа

Fig.10. Temporary tear resistance and conditional yield strength, MPa

Выводы

1. Добавление магния, а затем марганца и скандия (до 0,3 %) приводит к постепенному измельчению зерна за счет уменьшения поверхностного натяжения между жидкой и твердой фазой. В тоже время без комбинированного скандиево-циркониевого легирования малыми добавками равноосной недендритной структуры не наблюдается. Добавление циркония и гафния ведет к существенному измельчению зёрненной структуры и появлению равноосного зерна за счет появления в жидкой фазе первичных частиц Al_3Sc .

2. При исследовании сплава 1570 обнаружены крупные эвтектические частицы, содержащие Sc, Zr и некоторое количество наночастиц частиц $Al_3(Sc,Zr)$ образующихся, в основном, из-за прерывистого распада пересыщенного твердого раствора при остывании слитка. При добавлении гафния, вследствие скорости диффузии значительная часть скандия находится в пересыщенном твердом растворе, и частицы Al_3Sc не формируются при остывании слитка.

3. Добавление марганца и особенно магния приводит к существенному твердорастворному упрочнению. Добавки скандия в диапазоне до 0,3 % без циркония не ведут к существенному росту прочности. Однако комбинированное скандиево-циркониевое легирование приводит при остывании слитка к образованию частиц $Al_3(Sc,Zr)$, что повышает механические свойства. Их увеличение так же связано с измельчением зерна. В целом эффект от твердорастворного упрочнения составляет 180-200 МПа. Измельчение зерна совместно с появлением мелкодисперсных наночастиц $Al_3(Sc,Zr)$ приводит к повышению свойств в среднем на 50 МПа.

Список литературы

1. Du H., Zhang S., Zhang B., Belov N., 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, N 28. P. 16145-16157.

2. Savchenkov S., Kosov Y., Bazhin V., Krylov K., Kawalla R. Microstructural Master Alloys Features of Aluminum–Erbium System // *Crystals*. 2021. V. 11, N 11. P. 1353.

3. Belov N.A., Shurkin P.K., Korotkova N.O., Cherkasov S.O., The effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of cold-rolled sheets made of Al–Cu–Mn alloys with varying copper to manganese ratios // *Tsetnye Metally*. 2021. V. 9. P. 80–86.

4. Belov N.A., Akopyan T.K., Cherkasov S.O., Timofeev V.N. Effect of heat treatment on the structure, mechanical and electrical properties of wire alloy Al–_{3.3}Cu–_{2.5}Mn–_{0.5}Zr (wt %) manufactured by electromagnetic casting // В сб. тезисов III Международной школы-конференции молодых ученых «Synthesis, structure, and properties of high-entropy materials»: Екатеринбург, 2021. P. 15.

5. Bazhin V.Y., Alattar A.L., Danilov I.V., Development of technologies for the production of multi-component ligatures Al–Cu–BC with high thermal characteristics // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. V. 537, N 2. P. 022037.

6. Бронз А.В. Сплав 1570С-материал для герметичных конструкций перспективных многогоразовых изделий РКК "Энергия" // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 4(7). С. 62–67.

7. Sanders R.E., Baumann S.F., Stumpf H.C. Wrought non-heat treatable aluminum alloys // *Treatise in Materials Science & Technology*. 2012. V. 31. P. 65.

8. Totten G.E., MacKenzie D.S. (ed.). *Handbook of aluminum: V. 1: physical metallurgy and processes*. CRC press, 2003. 1296 p.

9. Davydov V.G., Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostova T.D. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives // *Metal Science and Heat Treatment*. 1996. V. 38, N 8. P. 347–352.

10. Zakharov V.V. Combined alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium // *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. V. 56, N 5. P. 281–286.

11. 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. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by haf-

nium // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. V. 26, N 12. P. 3059–3069.

12. Hallem H., Marthinsen K., Lefebvre W., Danoix F., Forbord B. The formation of $Al_3(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})$ -dispersoids in aluminium alloys // Materials Science and Engineering: A. 2006. V. 421, N 1–2. P. 154–160.

13. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 7. С. 7–15.

14. Деев В.Б., Войтков А.П., Селянин И.Ф. Микролегирование алюминиевых сплавов марганцем // Ползуновский альманах. 2006. № 3. С. 38–39.

15. Furushiro N., Hori S. A possible mechanism of phase transformation of Al_3Hf from $L1_2$ to $D0_{22}$ during aging in a rapidly solidified $Al_3Hf_{-0.3}Si$ alloy // Acta Metallurgica. 1985. V. 33, N 5. P. 867–872.

16. Wang F., Qiu, D., Liu, Z.L., Taylor, J.A., Easton, M.A., Zhang, M.X. The grain refinement mechanism of cast aluminium by zirconium // Acta Materiala. 2013. V. 61, N 15. P. 5636–5645.

17. Бринза В.В., Нестерова Н.В., Перк О.Н. Обобщение информации о диаграммах состояния двойных систем гафния // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 38–45.

18. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королева И.Г. Исследование фазовых равновесий в богатых алюминием сплавах системы $Al-Mg-Sc-Zn$ при 430 и 300 °С // Металлы. 2008. № 1. С. 108–108.

19. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Изд-во: Металлургия, 1979. 640 с.

20. Rokhlin L.L., Bochvar N.R., Boselli J., Dobatkina T.V. 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. 2010. V. 31, N 4. P. 327–332.

21. Blake N., Hopkins M.A. Constitution and age hardening of $Al-Sc$ alloys // Journal of Materials Science. 1985. V. 20, N 8. P. 2861–2867.

22. Norman A.F., Prangnell P.B., McEwen R.S. The solidification behaviour of dilute aluminium-scandium alloys // Acta materialia. 1998. V. 46, N 16. P. 5715–5732.

Информация об авторах

И.А. Зорин – лаборант ОНИЛ № 4 Самарского университета, студент группы 1421-220302D Самарского университета.

А. М. Дриц – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОНИЛ № 4 Са-

марского университета, директор по развитию бизнеса и технологий АО “Арконик СМЗ”.

Е. В. Арышенский – кандидат технических наук, доцент, научный руководитель ОНИЛ № 4 Самарского университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

Ф. В. Гречников – доктор технических наук, заведующий кафедрой ОМД Самарского университета, академик РАН.

В. С. Комаров – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

References

1. Du, H., Zhang, S., Zhang, B., Tao, X., Yao, Z., Belov, N. & Liu, Z. (2021). Ca-modified $Al-Mg-Sc$ alloy with high strength at elevated temperatures due to a hierarchical microstructure. *Journal of Materials Science*, 56(28), 16145–16157.

2. Savchenkov, S., Kosov, Y., Bazhin, V., Krylov, K. & Kawalla, R. (2021). Microstructural Master Alloys Features of Aluminum–Erbium System. *Crystals*, 11(11), 1353.

3. Belov, N. A., Shurkin, P. K., Korotkova, N. O. & Cherkasov, S. O. (2021). The effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of cold-rolled sheets made of $Al-Cu-Mn$ alloys with varying copper to manganese ratios. *Tsetnye Metally*, (9), 80–86.

4. Belov, N. A., Akopyan, T. K., Cherkasov, S. O. & Timofeev, V. N. Effect of heat treatment on the structure, mechanical and electrical properties of wire alloy $Al_{-3.3}Cu_{-2.5}Mn_{-0.5}Zr$ (wt %) manufactured by electromagnetic casting. On Sat. Abstracts of the III International School-Conference for Young Scientists "Synthesis, structure, and properties of high-entropy materials": Ekaterinburg, 2021. P. 15. (In Russ.).

5. Bazhin, V. Y., Alattar, A. L., & Danilov, I. V. (2019). Development of technologies for the production of multi-component ligatures $Al-Cu-BC$ with high thermal characteristics. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 2(537), 022037.

6. Bronz, A. V. (2014). Alloy 1570C-material for hermetic structures of promising reusable prod-

- ucts of RSC Energia. *Space technology and technology*. 4 (7), 62–67. (In Russ.).
7. Sanders, R. E., Baumann, S. F., & Stumpf, H. C. (2012). Wrought non-heat treatable aluminum alloys. *Treatise in Materials Science & Technology*, 31, 65.
8. Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: V. 1: physical metallurgy and processes*. CRC press. P. 1296.
9. 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.
10. Zakharov, V. V. (2014). Combined alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium. *Metal Science and Heat Treatment*, 56(5), 281–286.
11. 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.
12. Hallem, H., Lefebvre, W., Forbord, B., Danoix, F. & Marthinsen, K. (2006). The formation of $Al_3(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})$ -dispersoids in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 421(1–2), 154–160.
13. Zakharov, V. V. (2003). Influence of scandium on the structure and properties of aluminum alloys. *Metallurgy and heat treatment of metals*, (7), 7–15. (In Russ.).
14. Deev, V. B., Voytkov, A. P. & Selyanin, I. F. (2006). Microalloying of aluminum alloys with manganese. *Polzunovsky Almanac*, (3), 38–39. (In Russ.).
15. Furushiro, N. & Hori, S. (1985). A possible mechanism of phase transformation of Al_3Hf from $L1_2$ to $D0_{22}$ during aging in a rapidly solidified $Al-3Hf-0.3Si$ alloy. *Acta Metallurgica*, 33(5), 867–872.
16. Wang, F., Qiu, D., Liu, Z. L., Taylor, J. A., Easton, M. A., & Zhang, M. X. (2013). The grain refinement mechanism of cast aluminium by zirconium. *Acta materialia*, 61(15), 5636–5645.
17. Brinza, V. V., Nesterova, N. V. & Perk, O. N. (2015). Generalization of information on state diagrams of hafnium binary systems. *News of universities. Non-ferrous metallurgy*, (4), 38–45. (In Russ.).
18. Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V. & Korolkova, I. G. (2008). Investigation of phase equilibria in aluminum-rich alloys of the Al–Mg–Sc–Zn system at 430 and 300 °C. *Metals*, (1), 108–108. (In Russ.).
19. Mondolfo, L. F. (1979). *Structure and properties of aluminum alloys*. Publishing house: Metallurgy. P. 640. (In Russ.).
20. 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(4), 327–332.
21. Blake, N. & Hopkins, M. A. (1985). Constitution and age hardening of Al–Sc alloys. *Journal of Materials Science*, 20(8), 2861–2867.

Information about the authors

I. A. Zorin – Laboratory Assistant at ONIL No. 4 of Samara University, Student of group 1421-220302D of Samara University.

A. M. Drits – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at ONIL No. 4 of Samara University, Director of Business and Technology Development at Arconic SMZ JSC.

E. V. Aryshenskii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Supervisor of ONIL No. 4 of Samara University.

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Science, Professor, Vice Rector, Siberian State Industrial University.

F. V. Grechnikov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of OMD of Samara University, Academician of the Russian Academy of Sciences.

V. S. Komarov – Candidate of Technical Sciences PhD, Senior Researcher at the Laboratory of «Ultrafine-grained metallic Materials» of National Research Technological University "MISIS", Researcher of A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences.

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 24.11.2022; принята к публикации 29.11.2022.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 22; approved after reviewing 24 Nov. 22; accepted for publication 29 Nov. 22.