



УДК 621.74

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ЩЕЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДОЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

К. В. НИКИТИН, И. Ю. ТИМОШКИН, Р. М. БИКТИМИРОВ, В. Н. ДЬЯЧКОВ,

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Представлены результаты сравнительных исследований модифицирующей способности La, Sc (группа редкоземельных металлов) и Sr (группа щелочноземельных металлов) при обработке сплава АК9ч. Элементы вводили в расплав лигатурами AlLa12, AlSc2, AlSr10 в одинаковом количестве – 0,25 мас.%. Модифицирование в разной степени способствовало увеличению механических свойств сплава АК9ч. При модифицировании добавками Sr отмечен максимальный прирост предела прочности (на 60–66%), но в меньшей степени повышение твердости HB и относительного удлинения сплава по сравнению с модифицированием La и Sc. Модификаторы из группы редкоземельных металлов (La и Sc) по-разному изменили морфологию основных фаз. При модифицировании La морфология кристаллов эвтектического кремния изменилась с пластинчатой на волокнистую. Модифицирование добавками Sc вызвало аналогичные изменения в морфологии эвтектического кремния и частичное модифицирование дендритов α -Al. Наибольший модифицирующий эффект на дендриты α -Al и кристаллы эвтектического кремния оказал стронций, относящийся к щелочноземельным металлам.

Ключевые слова. Сплавы системы Al–Si–Mg, редкоземельные и щелочноземельные металлы, модифицирование, структура, механические свойства.

FEATURES OF THE INFLUENCE OF RARE-EARTH AND ALKALINE-EARTH METALS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HYPOEUTECTIC SILUMINS

K. V. NIKITIN, I. Yu. TIMOSHKIN, R. M. BIKTIMIROV, V. N. DYACHKOV, Samara State Technical University, Samara, Russia, 244, Molodogvardeyskaya str. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

The results of comparative studies of the modifying ability of La, Sc (REE group) and Sr (alkaline-earth group) when processing the AK9ch alloy are presented. The elements were introduced into the melt with AlLa12, AlSc2, AlSr10 master alloys in the same amount – 0.25 wt.%. Modification to varying degrees contributed to an increase in the mechanical properties of the AK9ch alloy. The maximum increase in tensile strength (by 60–66%) was noted when modifying with Sr additions, but to a lesser extent, the hardness HB and the relative elongation of the alloy increased compared to the modification with La and Sc. The modifiers from the REE group (La and Sc) changed the morphology of the main phases in different ways. When modifying with La, the morphology of the eutectic silicon crystals changed from lamellar to fibrous. Modification with Sc additives caused similar changes in the morphology of the eutectic silicon and partial modification of the α -Al dendrites. The greatest modifying effect on the α -Al dendrites and the eutectic silicon crystals was exerted by strontium, which belongs to the alkaline-earth metals.

Keywords. Al–Si–Mg alloy system, rare-earth and alkaline-earth metals, modification, structure, mechanical properties.

Введение

Современные алюминиевые сплавы благодаря своей высокой удельной прочности, коррозионной и износостойкости широко применяются во многих конструкционных элементах как в аэрокосмической, так и в машиностроительной отраслях промышленности. Кроме того, простые и экономичные способы получения литых изделий из алюминиевых сплавов способствуют увеличению их доли в агрегатах и механизмах по отношению к литым изделиям из сплавов на основе других металлов [1].

Доля изделий из алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении составляет около 40–48% от общего потребления изделий из алюминия и его сплавов во всех отраслях промышленности [1–3].

Обеспечение требований по качеству литых изделий во многом определяется технологиями приготовления алюминиевых сплавов. Это прежде всего связано с тем, что в составах шихты используют

разнообразные материалы: первичные металлы, вторичные сплавы, лигатуры, возврат собственного производства и т. д. [4–8].

Модифицирование остается одной из основных операций, обеспечивающих формирование благоприятной структуры в литом изделии [9]. В конечном итоге мелкодисперсная однородная структура обуславливает требуемый уровень комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств сплавов и литых изделий [10, 11].

Наибольшая доля алюминиевых изделий производится из сплавов системы Al–Si–Mg и Al–Si–Cu. Для модифицирования доэвтектических силуминов в мировой практике чаще всего используют лигатуры систем Al–Zr, Al–Ti, Al–Ti–B и др. [12–15]. Это обусловлено тем, что в 1950-х годах установлен эффект измельчения структуры алюминиевых сплавов добавками титана [16]. Позднее выявлено, что модифицирующий эффект титана усиливается в присутствии бора [16, 17]. Указанные элементы (Zr, Ti, B), в первую очередь, оказывают модифицирующий эффект на дендриты α -Al по механизму инокуляции.

Наиболее эффективным модификатором кремния в доэвтектических и эвтектических силуминах, который нашел широкое промышленное применение, является стронций [18–20], относящийся к щелочно-земельным металлам (ЩЗМ). Исследователи отмечают два возможных, но противоречивых механизма при модифицировании силуминов добавками стронция [21]: 1) Sr способствует зарождению эвтектического кремния за счет уменьшения межфазной энергии расплава; 2) Sr препятствует зарождению эвтектического кремния за счет уменьшения числа потенциальных зародышей кремния в жидкости. Первый механизм относится к модифицированию по принципу инокуляции (увеличение числа зародышей на потенциальных центрах кристаллизации). Второй – к лимитационному механизму, ограничивающему рост зародышей за счет накопления стронция на поверхности кристалликов эвтектического кремния. На основании исследований, показавших увеличение переохлаждения при модифицировании стронцием, в ряде работ утверждается, что уменьшение числа потенциальных зародышей может приводить к увеличению размеров эвтектических зерен [22, 23]. При этом отмечается изменение морфологии эвтектического кремния с грубой пластинчато-игольчатой на волокнистую морфологию.

По мнению авторов [9, 16], к настоящему времени не сформировались единая теория и классификация механизмов модифицирования. Вероятно, именно поэтому продолжают исследования по модифицирующему влиянию различных элементов на структуру и свойства сплавов на основе алюминия. Внимание исследователей привлекает возможность использования некоторых редкоземельных металлов (РЗМ) в качестве модификаторов для силуминов [24–28]. На основании экспериментов в ряде работ установлено, что добавки РЗМ в определенных количествах изменяют не только морфологию эвтектического кремния, но и оказывают измельчающее воздействие на кристаллы эвтектического и первичного кремния в заэвтектических силуминах.

Цель данной работы – сравнительный анализ эффективности модифицирования сплава АК9ч (система Al–Si–Mg, ГОСТ1583–93) добавками La, Sc и Sr.

Материалы и методика экспериментов

Сплав АК9ч (табл. 1) готовили переплавом промышленного чушкового сплава в индукционной тигельной печи марки УИП-001 в графитовом тигле емкостью 10 кг по Al.

Таблица 1. Химический состав сплава АК9ч (DIN 1725T.2)

Основные легирующие компоненты, %			Примеси, %, не более				
Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti+Zr
8,00–10,50	0,20–0,35	0,20–0,50	0,50	0,30	0,30	0,10	0,12

При температуре 750±5 °С расплав рафинировали флюсом CRISTAL 2000 (0,11 % от массы расплава). После выдержки в течение 20 мин с зеркала расплава снимали шлак, перемешивали и производили разливку в чугунные изложницы. Далее полученные шихтовые заготовки переплавляли отдельно в тигельных печах сопротивления GRAFICARBO GF.1100 в графитовых тиглях емкостью 1 кг по Al. Модифицирование осуществляли лигатурами AlLa12, AlSc2,2 и AlSr10. Характеристика технологии полученных лигатур и параметры модифицирования представлены в табл. 2.

Заливку модифицированных сплавов производили в стальной кокиль, получая образцы в виде пластины толщиной 15 мм.

Таблица 2. Характеристика лигатур и параметры модифицирования

Лигатура	Способ получения	Вид	Количество вводимого в сплав элемента, мас.%
AlLa12	Прямое сплавление Al и La; заливка в кокиль ($v_{\text{охл}} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$)	Пруток, $\varnothing 5 \text{ мм}$	0,25
AlSc2,2	Переплав чушковой лигатуры; заливка в валковый кристаллизатор ($v_{\text{охл}} \sim 103 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$)	Лента, толщина 2 мм	
AlSr10			

Химический состав сплавов определяли на спектроанализаторе ARL 3460. Механические испытания сплава в литом состоянии проводили на разрывной машине Testometric модели FS150kN-AX. Твердость HB определяли на твердомере TP5006 УХЛ 4.2. Для качественной оценки структуры сплава определяли значения электропроводности γ с помощью вихретокового структуроскопа ВЭ-26НП. Металлографический анализ выполняли с помощью программно-аппаратного комплекса SIAMS800.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Микроструктура модифицирующих лигатур показана на рис. 1. В лигатуре AlLa12 (рис. 1, а), закристаллизованной с $v_{\text{охл}} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, сформировались интерметаллиды Al_4La игольчато-пластинчатой морфологии. Лигатуры AlSc2,2 и AlSr10 (рис. 1, б, в), полученные при повышенной скорости охлаждения ($v_{\text{охл}} \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$), характеризуются наличием компактных интерметаллидов с глобулярной морфологией ScAl_3 и SrAl_4 соответственно.

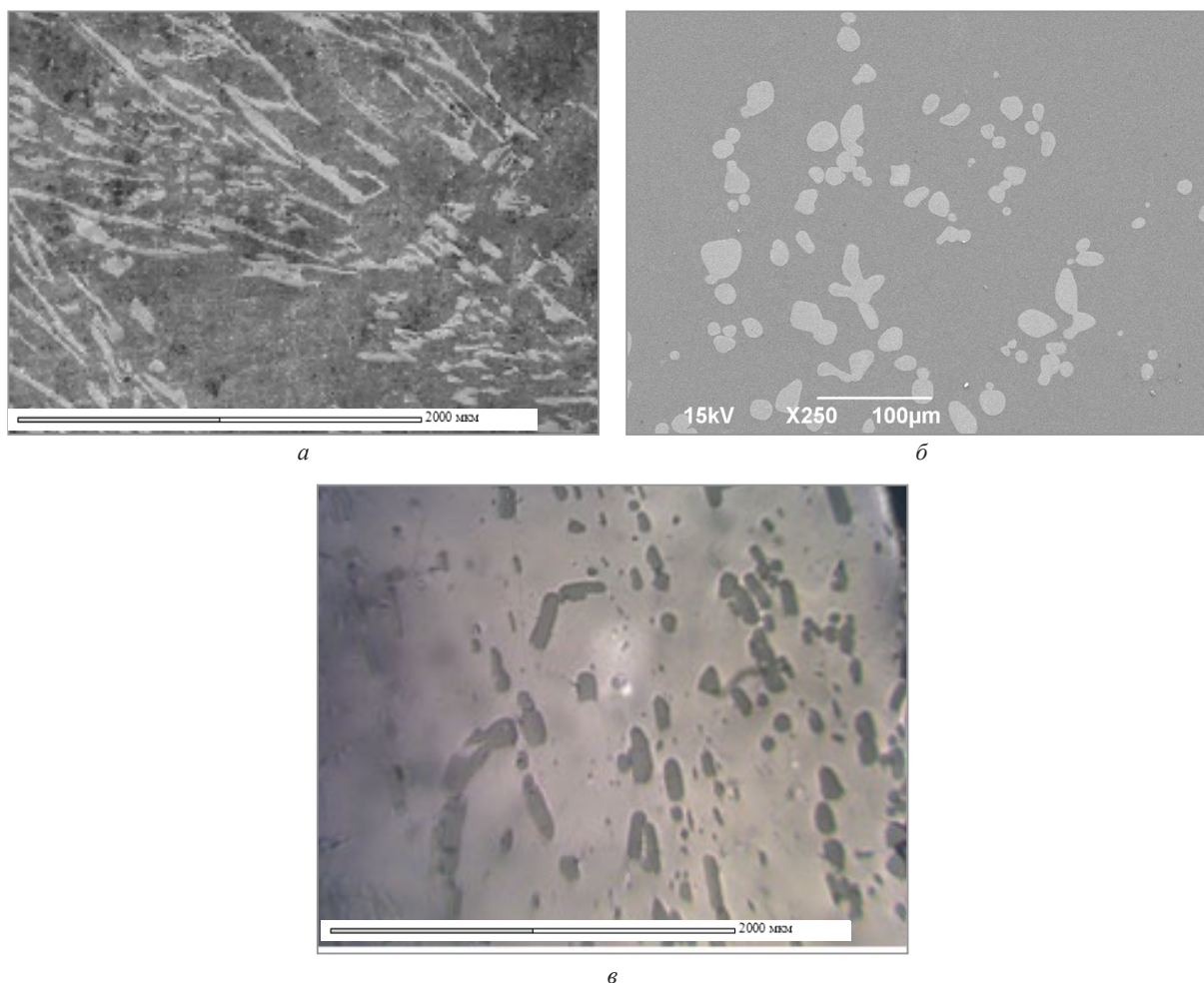


Рис. 1. Микроструктура модифицирующих лигатур: а – лигатура AlLa12; б – AlSc2,2; в – AlSr10

На рис. 2 представлены микроструктуры сплава АК9ч в немодифицированном (а) и модифицированном (б–г) состояниях. Добавки La и Sc изменили морфологию эвтектического кремния с пластинчатой на волокнистую (рис. 2, б, в). Модифицирование скандием оказало слабое воздействие на дендриты α -Al. Наибольший модифицирующий эффект на эвтектику и дендриты α -Al оказала лигатура AlSr10 (рис. 2, г).

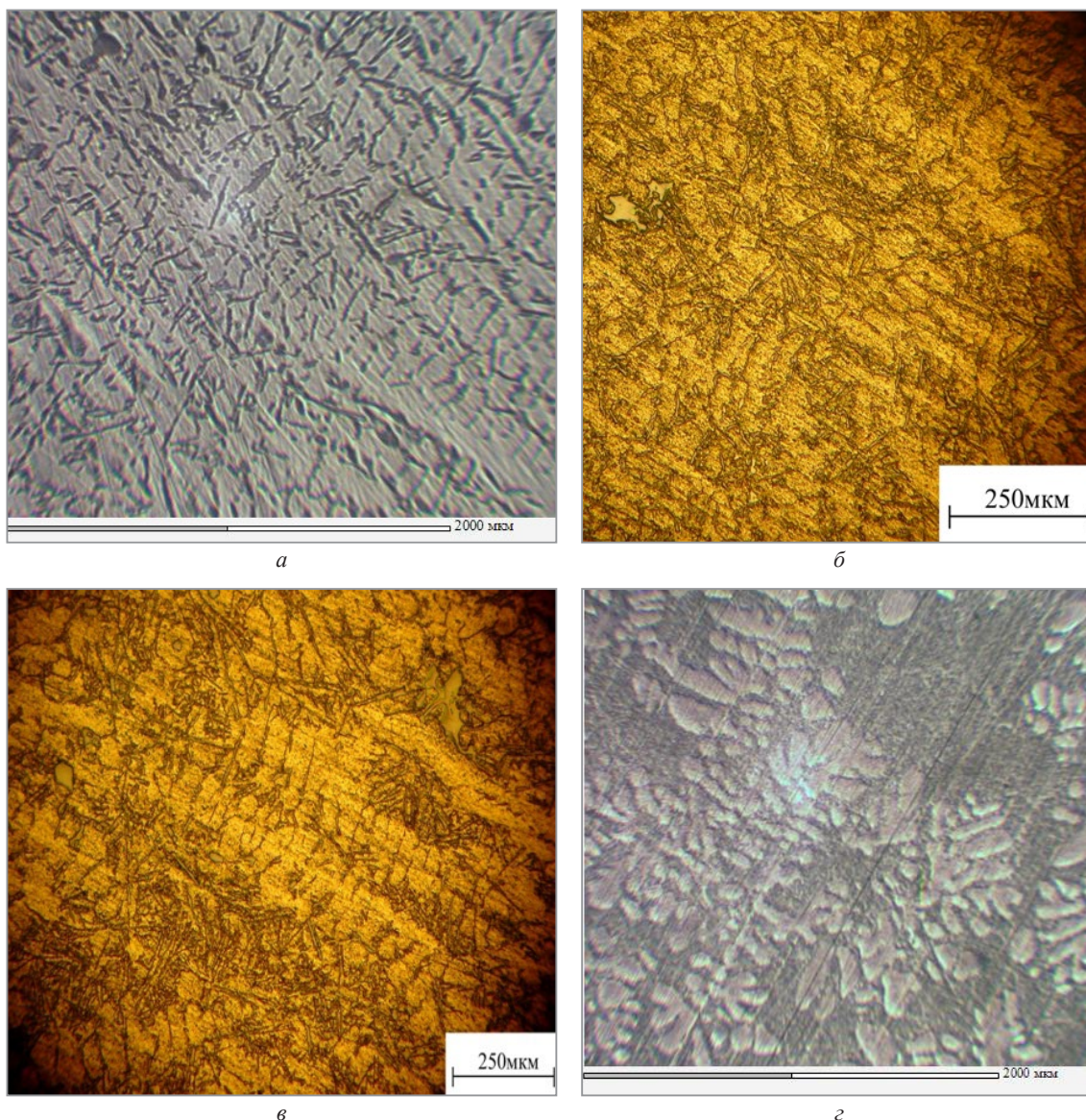


Рис. 2. Влияние модифицирования на структуру сплава АК9ч:
а – немодифицированный сплав; *б* – AlLa12; *в* – AlSc2,2; *г* – AlSr10

Модифицирование сплава добавками лигатур в разной степени способствовало увеличению механических свойств сплава АК9ч и его электропроводности (рис. 3). При этом максимальный прирост предела прочности на 60–66% отмечен при использовании лигатуры AlSr10 (рис. 3, *а*). В то же время модифицирование стронцием в меньшей степени повышает твердость HB и относительное удлинение сплава по сравнению с добавками лигатур AlLa12 и AlSc2,2 (рис. 3, *б*, *в*). Добавки лигатур повышают электропроводность сплава на 3–28% (рис. 3, *г*), что отражается изменениями в структуре. Максимальный рост электропроводности (на 17–28%) вызвало модифицирование сплава лигатурой AlSr10. Следует отметить, что модифицирование повышает однородность структуры по высоте исследуемых образцов, и, как следствие, выравниваются значения электропроводности (рис. 3, *г*).

В доступных научных публикациях нет единого мнения о механизмах модифицирования расплавов алюминиевых сплавов добавками РЗМ и стронция. В англоязычных статьях по модифицированию используют два термина, отражающих изменения структуры сплавов: *modify* – изменение (видоизменение) какой-либо фазы и *grain refine* – очистка зерна, измельчение зерна. Соответственно под термином «*modify*» подразумевается изменение морфологии фазы под воздействием модифицирующей добавки.

Изменение морфологии эвтектического кремния с пластинчато-игльчатой на волокнистую объясняется в основном за счет двойникования растущих кристаллов кремния в эвтектике на примесных атомах стронция, что вызывает понижение температуры эвтектики и увеличение переохлаждения по сравнению с немодифицированным состоянием расплава [21]. Однако, согласно рассчитанному идеальному

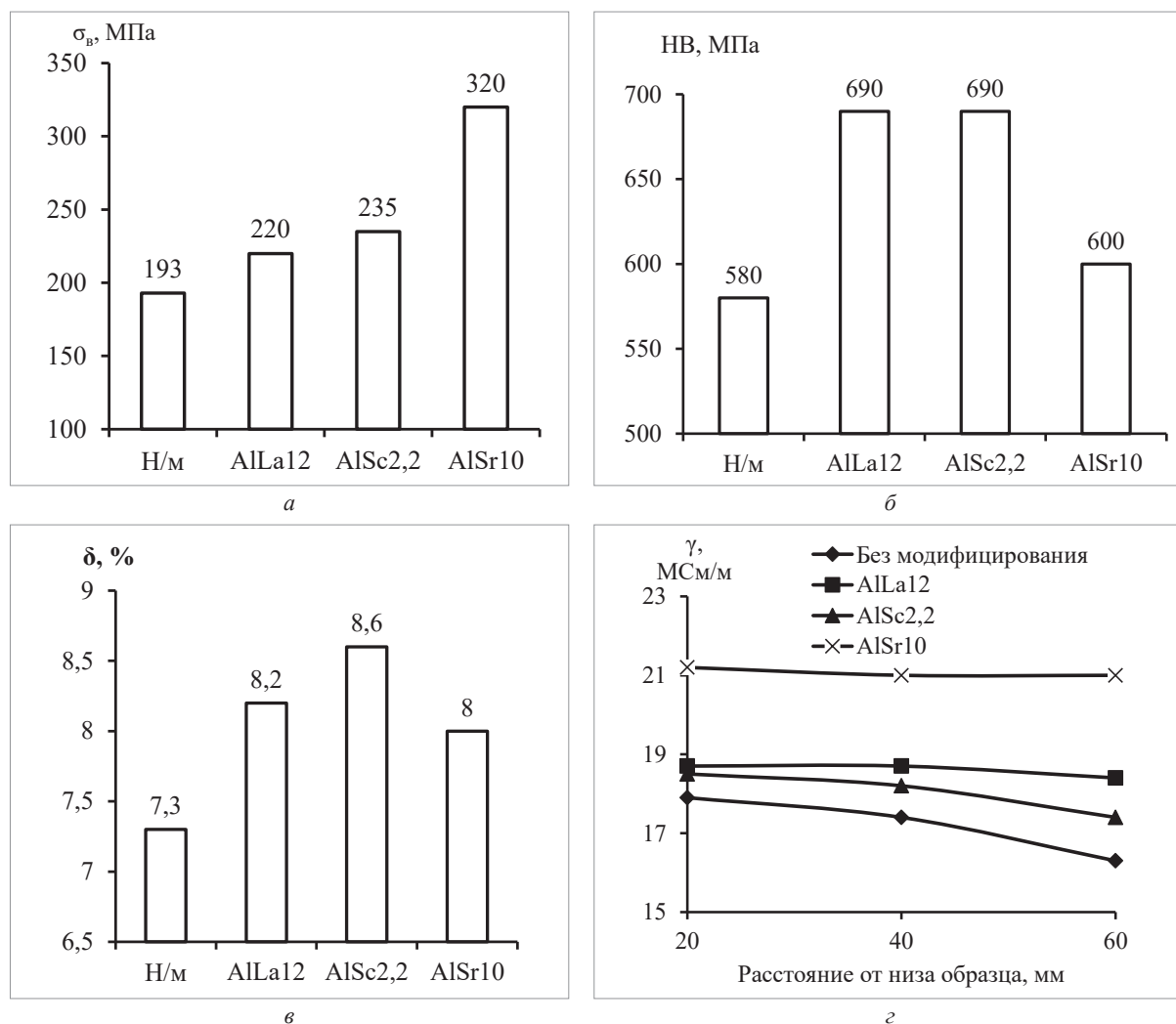


Рис. 3. Влияние модифицирования на механические свойства и электропроводность сплава АК9ч:
 а – предел прочности при растяжении; б – твердость НВ;
 в – относительное удлинение; г – электропроводность

соотношению радиусов примесного атома ($r_{ПА}$) и атома кремния ($r_{ПА}/r_{Si} \sim 1,646$), стронций, являясь хорошим модификатором кремния в эвтектике, не соответствует указанному соотношению ($r_{Sr}/r_{Si} \sim 1,84$) [18]. На основании собственных исследований авторы [18] делают вывод о том, что ведущую роль в изменении морфологии эвтектического кремния играют сегрегации интерметаллидных фаз двух типов – $SrAl_4Si_{33}$ (I) и $SrAl_2Si_{88}$ (II). Соответственно сегрегации I типа вызывают непосредственное двойникование растущего кристалла кремния. Сегрегации II типа, адсорбируясь на гранях двойниковых кристаллов, ограничивают их рост и вызывают изменение морфологии эвтектического кремния по лимитационному механизму. Таким образом, добавки стронция оказывают комплексное модифицирующее воздействие.

По механизму модифицирования силуминов добавками ряда РЗМ также нет единого мнения. На основании сравнительного исследования модифицирующей способности элементов-лантаноидов сделан вывод о том, что размерный фактор ($r_{ПА}/r_{Si} \sim 1,646$) не является решающим в определении эффективного модификатора [24]. Также не было получено убедительных доказательств превалирования механизма двойникования эвтектического кремния. Значит, модифицирование РЗМ может происходить по нескольким независимым механизмам. В [26] отмечается, что La и Ce не оказывают существенного влияния на изменение температуры формирования эвтектики и изменение ее морфологии. При этом показано, что ощутимый модифицирующий эффект может быть достигнут при введении порядка 1,5 мас.% La. Однако превышение какого-то порога по концентрации может привести к эффекту перемодифицирования.

Скандий из всех РЗМ является переходным металлом с недостроенной d -оболочкой. С алюминием Sc образует интерметаллид $ScAl_3$ по аналогии с Ti ($TiAl_3$) и Zr ($ZrAl_3$). Высокая модифицирующая

способность скандия при введении его в алюминий может быть объяснена с позиции электронной теории [29]. Одним из критериев, характеризующих модифицирующую способность переходных металлов, является акцепторная способность d -оболочки: $\xi = 1/(Nn)$, где N – главное квантовое число недостроенной d -оболочки; n – число электронов на d -оболочке. Акцепторная способность скандия ($\xi = 0,333$) выше, чем у титана (0,167) и циркония (0,125) [30]. В связи с этим измельчающее воздействие Sc на макрозерно и дендриты α -Al выше по сравнению с Ti и Zr. В данном случае модифицирование происходит по инокуляционному (зародышевому) механизму. При модифицировании силуминов Sc, вероятно, может образовывать сегрегации интерметаллидных комплексов (по аналогии со стронцием) и вызывать изменение морфологии эвтектического кремния по механизму двойникования [31]. Однако и в этом вопросе у исследователей нет единого мнения. В [32] отмечается, что добавки скандия в сплав Al-6Si-0,3Mg вызывают существенное измельчение дендритов α -Al. Уменьшение расстояний между ветвями второго порядка обуславливают изменение морфологии и размеров эвтектического кремния. Это позволяет сделать вывод о том, что механизм модифицирования силуминов добавками скандия аналогичен Ti и Zr.

Выводы

1. При одинаковом количестве вводимого компонента (0,25 мас.%) наибольший модифицирующий эффект на дендриты α -Al и кристаллы эвтектического кремния в сплаве АК9ч оказал стронций, относящийся к щелочноземельным металлам. В рамках проведенных экспериментов при модифицировании Sr установлено максимальное увеличение предела прочности при растяжении (на 60–66%) и электропроводности (на 17–28%) по сравнению с немодифицированным состоянием. При этом электропроводность образцов практически не изменяется по высоте, что косвенно свидетельствует о повышении однородности микроструктуры.

2. Модификаторы из группы редкоземельных металлов (La и Sc) изменяют морфологию основных фаз по-разному. При модифицировании La морфология кристаллов эвтектического кремния изменилась с пластинчатой на волокнистую, что подтверждает научные результаты других исследователей. Модифицирование добавками Sc вызвало аналогичные изменения в морфологии эвтектического кремния и частичное модифицирование дендритов α -Al. Наибольший эффект модифицирования добавки редкоземельных металлов оказали на твердость НВ и относительное удлинение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Stojanovic, B.** Application of aluminum and aluminum alloys in engineering / B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler // Applied Engineering Letters. – 2018. – Vol. 3, no. 2. – P. 52–62.
2. **Nappi, C.** The Global Aluminium Industry 40 years from 1972 / C. Nappi // World Aluminium. – 2013. – 27 p.
3. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry / M.N. Dudin [et al.] // Metallurgija. – 2017. – Vol. 56. – P. 255–258.
4. **Djurdjević, M. B.** Melt quality control at aluminum casting plants / M. B. Djurdjević, Z. Odanović, J. Pavlović-Krstić // Metallurgical & Materials Engineering. – 2010. – Vol. 16. – P. 63–76.
5. **Никитин, В. И.** Наследственность в литых сплавах / В. И. Никитин, К. В. Никитин. – М.: Машиностроение-1, 2005.
6. **Никитин, К. В.** Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности / К. В. Никитин, В. И. Никитин, И. Ю. Тимошкин. – М.: Радунца, 2015.
7. **Селянин, И. Ф.** Ресурсо- и экологосберегающие технологии производства вторичных алюминиевых сплавов / И. Ф. Селянин, В. Б. Деев, А. В. Кухаренко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 20–25.
8. **Деев, В. Б.** Термоскоростная обработка алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям / В. Б. Деев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 38–40.
9. **Никитин, В. И.** О классификации модификаторов для получения литейных и деформируемых сплавов / В. И. Никитин, К. В. Никитин // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 6. – С. 8–17.
10. **McCartney, D. G.** Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants / D. G. McCartney // International Materials Reviews. – 1989. – Vol. 34. – No. 5. – P. 247–260.
11. **Murty, B. S.** Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying / B. S. Murty, S. A. Kori, M. Chakraborty // International Materials Reviews. – 2002. – Vol. 47, no. 1. – P. 3–29.
12. **Sigworth, G. K.** The modification of Al–Si casting alloys: Important practical and theoretical aspects / G. K. Sigworth // Inter. J. Metalcast. – 2008. – Vol. 2, no. 2. – P. 19–40.
13. **Rathod, N. R.** Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy: A review / N. R. Rathod, J. V. Manghani // Inter. J. Emerging Trends in Engineering and Development. – 2012. – Vol. 5, no. 2. – P. 574–581.
14. **Faraji, M.** Grain refinement and modification in hypoeutectic Al–Si alloys / M. Faraji, L. Katgerman // Foundry Trade Journal. – 2010. – Vol. 184. – P. 315–318.

15. **Fang, Q.** Porosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings / Q. Fang, D. Granger // AFS Trans.– 1989.– No. 97.– P. 989–1000.
16. **Safwan, M.A.** Al-Qawabah. Different methods for grain refinement of materials / Safwan M.A. Al-Qawabah, Adnan I. O. Zaid // International Journal Of Scientific & Engineering Research.– 2016.– Vol. 7, iss. 7.– P. 1133–1140.
17. **Rana, R.S.** Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum / R. S. Rana, Rajesh Purohit, S. Das // International Journal of Scientific and Research Publications.– 2012.– Vol. 2, iss. 6.– P. 1–7.
18. The role of strontium in modifying aluminium – silicon alloys / M. Timpel [et al.] // Acta Materialia.– 2012.– Vol. 60, iss. 9.– P. 3920–3928.
19. The effect of strontium on the mechanical properties of aluminum – silicon alloy / A. I. Averkin [et al.] // Technical Physics Letters.– 2016.– Vol. 42, no. 2.– P. 201–203.
20. **Chandra Sekhar Rao, P.V.** Influence of melt treatments on dry sliding wear behavior of hypereutectic Al-15Si-4Cu cast alloys / P. V. Chandra Sekhar Rao, A. Satya Devi, K. G. Basava Kumar // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering.– 2012.– Vol. 6, no. 1.– P. 55–61.
21. **Makhlouf, M.** On the mechanism of modification of the aluminum-silicon eutectic by strontium: the role of nucleation / M. Makhlouf // International Journal of Metalcasting.– 2010.– No. 4.– P. 47–50.
22. Eutectic grains in unmodified and strontium-modified hypoeutectic aluminum-silicon alloys / S. D. McDonald [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A.– 2004.– Vol. 35, no. 6.– P. 1829–1837.
23. **McDonald, S.D.** Eutectic grain size and strontium concentration in hypoeutectic aluminium-silicon alloys / S. D. McDonald, N. Kazuhiro, A. K. Dahle // Journal of Alloys and Compounds.– 2006.– Vol. 422, iss. 1–2.– P. 184–191.
24. **Kazuhiro, N.** Eutectic Modification of Al-Si Alloys with Rare Earth Metals / N. Kazuhiro, S. D. McDonald, A. K. Dahle // Materials Transactions.– 2004.– Vol. 45, no. 2.– P. 323–326.
25. On the modification of hypereutectic Al-Si alloys using rare earth Er / P. Xing [et al.] // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.).– 2010.– Vol. 23, no. 5.– P. 327–333.
26. Effect of Rare Earth Metals on the Microstructure of Al-Si Based Alloys / S.A. Alkahtani // Materials.– 2016.– Vol. 9, no. 45.– P. 1–13.
27. **Ri, E. Kh.** Effect of Al-Y-Ce-La master alloy on structure formation, liquation processes and properties of AK7ch silumine (AL9) / E. Kh. Ri, Kh. Ri, A. V. Goncharov // Proceedings of the ICMTMTE 2019. Sevastopol, 9–13 September 2019. MATEC Web Conf.– 2019.– Vol. 298, no. 56.– P. 1–6.
28. **Gopi Krishna, S.** Effect of Strontium Modification and Heat Treatment on Microstructure of Al-319 Alloy / S. Gopi Krishna // International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering.– 2013.– Vol. 2, iss. 1.– P. 53–56.
29. **Ламихов, Л. К.** О модифицировании алюминия и сплава АЛ7 переходными металлами / Л. К. Ламихов, Г. В. Самсонов // Цветные металлы.– 1964.– № 1.– С. 24.
30. Влияние различных видов обработки на структуру, плотность и электропроводность деформируемых сплавов системы Al-Mg / К. В. Никитин [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия.– 2017.– № 4.– С. 46–52.
31. **Wattanachai, P.** Modification of hypoeutectic Al-Si alloys with scandium / P. Wattanachai, S. Nakorn, L. Chaowalit // Journal of Alloys and Compounds.– 2009.– Vol. 477.– P. 454–460.
32. **Kaiser, M.S.** Effect of scandium on the cast Al-Si-Mg alloy / M. S. Kaiser, M. R. Basher, A. S. W. Kurny // Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering: ICME09-RT-55 (Dhaka, 26–28 December 2009).– 2009.– P. 1–6.

REFERENCES

1. **Stojanovic B., Bukvic M., Epler I.** Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 52–62.
2. **Nappi C.** The Global Aluminium Industry 40 years from 1972. *World Aluminium*, 2013, 27 p.
3. **Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H.** Modern trends and challenges of development of global aluminum industry. *Metallurgija*, 2017, vol. 56, pp. 255–258.
4. **Djurdjević M.B., Odanović Z., Pavlović-Krstić J.** Melt quality control at aluminum casting plants. *Metallurgical & Materials Engineering*, 2010, vol. 16, pp. 63–76.
5. **Nikitin V.I., Nikitin K.V.** *Nasledstvennost' v lityh splavah* [Heredity in cast alloys]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005.
6. **Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I. Yu.** *Upravlenie kachestvom lityh izdelij iz alyuminievyh splavov na osnove yavleniya strukturnoj nasledstvennosti* [Quality management of cast products from aluminum alloys based on the phenomenon of structural heredity]. Moscow, Radunitsa Publ., 2015.
7. **Selyanin I.F., Deev V.B., Kukharenko A.V.** Resurso- i ekologosberegayushchie tekhnologii proizvodstva vtorichnyh alyuminievyh splavov [Resource- and environmentally-saving technologies for the production of secondary aluminum alloys]. *Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya = News from universities. Non-ferrous metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 20–25.
8. **Deev V.B., Selyanin I.F., Ponomareva K.V., Yudin A.S., Tsetsorina S.A.** Termoskorostnaya obrabotka alyuminievyh splavov pri lit'e po gazificiruemyh modelyam [Thermo-high-speed processing of aluminum alloys during casting using gasified models]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = News from universities. Ferrous metallurgy*, 2014, no. 4, pp. 38–40.
9. **Nikitin V.I., Nikitin K.V.** O klassifikacii modifikatorov dlya polucheniya litejnyh i deformiruemyh splavov [On the classification of modifiers for the production of cast and wrought alloys]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy and mechanical engineering*, 2020, no. 6, pp. 8–17.
10. **McCartney D.G.** Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. *International Materials Reviews*, 1989, vol. 34, no. 5, pp. 247–260.
11. **Murty B.S., Kori S.A., Chakraborty M.** Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. *International Materials Reviews*, 2002, vol. 47, no. 1, pp. 3–29.

12. **Sigworth G.K.** The modification of Al–Si casting alloys: Important practical and theoretical aspects. *Inter. J. Metalcast*, 2008, vol. 2, no. 2, pp. 19–40.
13. **Rathod N.R., Manghani J.V.** Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy: A review. *Inter. J. Emerging Trends in Engineering and Development*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 574–581.
14. **Faraji M., Katgerman L.** Grain refinement and modification in hypoeutectic Al–Si alloys. *Foundry Trade Journal*, 2010, vol. 184, pp. 315–318.
15. **Fang Q., Granger D.** Porosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings. *AFS Trans.*, 1989, no. 97, pp. 989–1000.
16. **Safwan M.A.** Al-Qawabah, Adnan I. O. Zaid. Different methods for grain refinement of materials. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, vol. 7, iss. 7, pp. 1133–1140.
17. **Rana R.S., Rajesh Purohit, Das S.** Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, vol. 2, iss. 6.– P. 1–7.
18. **Timpel M., Wanderka N., Schlesiger R., Yamamoto T., Lazarev N., Isheim D., Schmitz G., Matsumura S., Banhart J.** The role of strontium in modifying aluminium – silicon alloys. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, iss. 9, pp. 3920–3928.
19. **Averkin A.I., Korchunov B.N., Nikanorov S.P., Osipov V.N.** The effect of strontium on the mechanical properties of aluminum–silicon alloy. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 201–203.
20. **Chandra Sekhar Rao P.V., Satya Devi A., Basava Kumar K.G.** Influence of melt treatments on dry sliding wear behavior of hypereutectic Al-15Si-4Cu cast alloys. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 55–61.
21. **Makhlouf M.** On the mechanism of modification of the aluminum-silicon eutectic by strontium: the role of nucleation. *International Journal of Metalcasting*, 2010, no. 4, pp. 47–50.
22. **McDonald S. D., Dahle A. K., Taylor J. A., John St.** Eutectic grains in unmodified and strontium-modified hypoeutectic aluminum-silicon alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, vol. 35, no. 6, pp. 1829–1837.
23. **McDonald S. D., Kazuhiro N., Dahle A. K.** Eutectic grain size and strontium concentration in hypoeutectic aluminium-silicon alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, vol. 422, iss. 1–2, pp. 184–191.
24. **Kazuhiro N., McDonald S. D., Dahle A. K.** Eutectic modification of Al–Si alloys with rare earth metals. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45, no. 2, pp. 323–326.
25. **Xing P., Gao B., Zhuang Y., Liu K., Tu G.** On the modification of hypereutectic Al–Si alloys using rare earth Er. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 2010, vol. 23, no. 5, pp. 327–333.
26. **Alkahtani S.A. Elgallad E. M. Tash M. M. Samuel A. M. Samuel F. H.** Effect of Rare Earth Metals on the Microstructure of Al–Si Based Alloys. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 45, pp. 1–13.
27. **Ri E. Kh., Ri Kh., Goncharov A. V.** Effect of Al–Y–Ce–La master alloy on structure formation, liquation processes and properties of AK7ch silumine (AL9). *Proceedings of the ICMTMTE 2019. Sevastopol, 9–13 September 2019. MATEC Web Conf.*, 2019, vol. 298, no. 56, pp. 1–6.
28. **Gopi Krishna S.** Effect of Strontium Modification and Heat Treatment on Microstructure of Al-319 Alloy. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 53–56.
29. **Lamikhov L. K., Samsonov G. V.** O modificirovanii alyuminiya i splava AL7 perekhodnymi metallami [On the modification of aluminum and AL7 alloy with transition metals]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1964, no. 1, p. 24.
30. **Nikitin K. V., Nikitin V. I., Krivopalov D. S., Glushchenkov V. A., Chernikov D. G.** Vliyanie razlichnyh vidov obrabotki na strukturu, plotnost' i elektroprovodnost' deformiruemyh splavov sistemy Al–Mg [The influence of various types of processing on the structure, density and electrical conductivity of deformable alloys of the Al–Mg system]. *Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya = News from universities. Non-ferrous metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 46–52.
31. **Wattanachai P., Nakorn S., Chaowalit L.** Modification of hypoeutectic Al–Si alloys with scandium. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 477, pp. 454–460.
32. **Kaiser M. S., Basher M. R., Kurny A. S. W.** Effect of scandium on the cast Al–Si–Mg alloy. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering: ICME09-RT-55 (Dhaka, 26–28 December 2009)*, 2009, pp. 1–6.